

Aku Hietala

## **ELEKTRONIIKKATUOTTEIDEN TUOTANTOTESTAUKSEN KEHITTÄMINEN**

# **ELEKTRONIIKKATUOTTEIDEN TUOTANTOTESTAUKSEN KEHITTÄMINEN**

Aku Hietala  
Opinnäytetyö  
Kevät 2020  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka, tuotantotekniikka

---

Tekijä: Aku Hietala

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Elektroniikkatuotteiden tuotantotestauksen kehittäminen

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Development of production testing of electronic products

Työn ohjaaja: Tauno Jokinen

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: kevät 2020

Sivumäärä: 55 + 2 liitettä

---

Opinnäytetyön tilaajana toimi lahtelainen teknologiayritys Teknoware Oy. Yritys valmistaa valaistuselektroniikkaa joukkoliikennevälineisiin ja kiinteistöihin. Työssä kehitettiin yrityksen tuotantotestausta. Työ oli osa yrityksen laajaa testauksen kehittämisprojektia. Tuotantotestausta kehitettiin, koska yrityksen nykyinen testausjärjestelmä aiheutti haasteita tuotannossa ja tuotekehityksessä. Haasteita olivat tuotantotestauksen heikko laatu ja testaukseen käytetyt resurssit. Käytännön osuudessa suunniteltiin yritykselle uusi tuotantotestausjärjestelmä testilaitteineen. Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin nykyaikaisen testausjärjestelmän toimintamalleihin, jäljitettävyyteen ja testauksen kehitysmenetelmiin elektroniikka-alalla.

Työn tuloksena syntynyt testausjärjestelmä täyttää asetetut tavoitteet. Tavoitteena oli nopeuttaa tuotekehitysprosessia ja parantaa tuotantotestauksen laatua. Tuotekehitys nopeutuu uuden ohjelmistopohjaisen testausjärjestelmän avulla, joka sopii useille tuotteille. Testausjärjestelmä koostuu LabVIEW- ja TestStand-ohjelmistoista, tietokannasta, testilaitteistosta ja kahdesta rajapinnasta. Uudella järjestelmällä poistetaan aikaa vievä tuotekohtaisten testausjärjestelmien suunnittelu. Tuotantotestauksen laatu paranee testausprosessin manuaalisten vaiheiden minimoinnilla, yksilöidyillä testituloksilla ja selkeällä hyväksytyn testin merkinnällä. Tuotantotestausta voidaan kehittää lisää systemaattisella testaussuunnittelulla (DFT).

Teknowarella testausprojekti jatkuu tässä työssä suunnitellun testilaitteiston testausohjelmiston kehityksellä, jota seuraa laitteiston käyttöönotto. Laitteiston todelliset hyödyt tuotekehitykselle ja tuotannolle voidaan mitata sitten, kun laitteistolla testataan ensimmäiset tuotteet. Laitteistoon liittyvät jatkotoimenpiteet ovat korkeajännitelaitteiden implementointi ja testimekaniikan kehittäminen suurille tuotantoerille.

---

Asiasanat: tuotantotestaus, toiminnallinen testaus, LabVIEW, DFT, jäljitettävyyden, National Instruments

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Mechanical Engineering, Production Engineering

---

Author: Aku Hietala

Title of thesis: Development of production testing of electronic products

Supervisor: Tauno Jokinen

Term and year of submitting: spring 2020

Pages: 55 + 2 appendices

---

This bachelor's thesis is made for electronics manufacturing company Teknoware Oy. The company is manufacturing lighting electronics for real estates and public transport vehicles. Subject of the thesis was to develop a production testing by designing a new testing system. The thesis was part of the company's extensive testing development project. Goal was to shorten time spent on test design in product development and to develop production testing quality. In practical part, a new production testing system and test process were designed. The literature review examined the general operating models of the testing system in the field of electronics, traceability and testing development methods.

The new test system fulfils the set requirements, which were a faster product development process and an improvement in the quality of production testing. Product development is accelerated with a new software-based testing system which is suitable for multiple products. The system eliminates time-consuming design of product-specific testing systems. The test system consists of LabVIEW and TestStand software, a database, test hardware, and two interfaces. Quality of production testing is improved by minimizing the manual steps of the testing process, individualized test results and clear marking of the approved test. Production testing can be further developed with systematic test design (DFT).

At Teknoware, the testing project continues with the development of testing software for the selected test equipment. This will be followed by the commissioning of the equipment. The real benefits of the test system in terms of product development and production can be measured when the first tests are done. Further steps related to the equipment are implementation of high-voltage equipment and development of test mechanics for large production batches.

---

Keywords: production testing, functional testing, LabVIEW, DFT, traceability, National Instruments

## ALKULAUSE

Tämän insinöörityön tilaajana toimi lahtelainen Teknoware Oy. Työn ohjaajana Teknowarella toimi tuotekehitysjohtaja Matti Alava. Ohjaavana opettajan toimi konetekniikan yliopettaja Tauno Jokinen Oulun ammattikorkeakoulusta. Työtä edisti Teknowaren asiantunteva henkilöstö tuotannossa, tuotekehitys-, mekaniikka-, projekti- ja after sales -osastoilla.

Haluan kiittää kaikkia edellä mainittuja henkilöitä työn etenemisen tukemisesta ja arvokkaasta avusta.

Helsingissä 7.4.2020

Aku Hietala

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKULAUSE.....	5
1 JOHDANTO .....	9
1.1 Työn tausta.....	9
1.2 Työn tavoitteet.....	10
1.3 Työn toteutus.....	10
2 TESTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN.....	12
2.1 Tuotantotestaus.....	12
2.2 Toiminnallinen testaus.....	13
2.3 Testauskattavuus .....	14
2.4 Testausjärjestelmä toiminnalliselle testaukselle .....	15
2.4.1 Tuotekehityksen haasteet testauksessa .....	17
2.4.2 Tuotekehitystä tukeva testausjärjestelmä .....	17
2.5 Jäljitettävyys .....	18
2.5.1 Yksilöllinen tunniste .....	22
2.5.2 Tuotteen elinkaaren hallinta .....	23
2.6 Testauskeskeinen suunnittelu .....	23
2.7 Valmistuskeskeinen suunnittelu .....	25
2.8 Yhteenveto .....	25
3 TESTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU TEKNOWARE OY:LLE .....	28
3.1 Testattavien tuotteiden määrittäminen.....	28
3.2 Tuotevaatimukset .....	28
3.3 Osastojen vaatimukset testauslaitteistolle .....	29
3.3.1 Tuotanto.....	29

3.3.2	Tuotekehitys.....	30
3.3.3	After sales .....	32
3.4	Testilaitteiston valinta .....	32
3.5	Adapterikortti ja testimekaniikka .....	35
3.6	Jäljitettävyyden kehittäminen.....	37
3.7	Elektroniikkatuotantoprosessi.....	38
3.8	Muutokset tuotantotestausprosessiin .....	39
3.8.1	Ohjelmoinnin suorittaminen korttitestin yhteydessä .....	40
3.8.2	Testaajan tunnistaminen ja merkintä.....	40
3.8.3	Tuotteeseen tulostettavat tarrat .....	40
3.8.4	Tuotantotestin suorittaminen .....	42
3.9	Tuotekehityksen hyödyt.....	43
3.9.1	Nykyinen tuotekehitysprosessi.....	44
3.9.2	Uusi tuotekehitysprosessi .....	44
3.9.3	Testausoptimointi.....	46
3.10	Jatkokehitysideat.....	47
3.10.1	Laitteisto.....	47
3.10.2	Jäljitettävyys.....	47
3.10.3	Testaus- ja valmistuskeskeinen suunnittelu .....	47
3.11	Vastaukset tutkimuskysymyksiin .....	48
4	YHTEENVETO .....	50
	LÄHTEET .....	52
	LIITTEET	
	Liite 1 Testilaitteiston osaluettelo	
	Liite 2 Testilaitteiston kaavio	

## KÄSITTEET

AOI	Automatic Optical Inspection, automaattinen optinen tarkistusmenetelmä
DFM	Design for Manufacturing, valmistuskeskeinen suunnittelu
DFT	Design for Testing, testauskeskeinen suunnittelu
EMS	Electronics Manufacturing Services, yhtiö, joka suunnittelee, valmistaa, jakelee ja tarjoaa huoltopalveluita elektroniikkakomponenteille
ERP	Enterprise Resource Planning, toiminnanohjausjärjestelmä
FT	Functional Testing, toiminnallinen testaus
HV	High Voltage, korkeajännite
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, National Instrumentsin kehittämä graafinen ohjelmointiympäristö
MVI	Manual Visual Inspection, manuaalinen optinen tarkistusmenetelmä
PCB	Printed Circuit Board, piirilevy
PCI	Peripheral Component Interconnect, tietokoneväylän liitännän tyyppi, jonka avulla liitetään lisälaitteita
PWM	Pulse-Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
RFID	Radio Frequency Identification, radiotaajuinen etätunnistus menetelmä
SMT	Surface-Mount Technology, pintaliitosladonta
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, universaali sarjaliikenneväylä



# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä kehitetään työn tilaajan tuotantotestausta. Opinnäytetyö on osa yrityksen laajaa testauksen kehittämisprojektia. Elektronisten laitteiden kasvava monimutkaisuus, nopea tuotekehitys ja pienentyneet budjetit ovat nykypäivän tuotekehityksen haasteita (1). Työn tilaajan haasteet liittyvät tuotantotestaukseen ja testauksen suunnitteluun. Laitteiden testauksen suunnittelu hidastaa tuotekehitystä ja sitoo resursseja. Testauksessa haasteena on ollut testien luotettavuus ja tuotteiden jäljitettävyys.

Testaaminen on tärkeää laadun varmistamisen kannalta, ja virheiden löytäminen testauksen avulla on taloudellisesti kannattavaa tuotteen valmistajalle. Testauksen kehittäminen on kannattavaa, sillä parannukset testausmenetelmään lyhentävät testiaikoja ja vähentävät tuotteiden kustannuksia (2, s. 402). Tämä työ keskittyy uuden testausjärjestelmän määrittämiseen, laitteiden valintaan ja testausprosessin kehittämiseen. Käytännön osuuden lisäksi opinnäytetyö on kirjallinen selvitys siitä, miten tuotantotestausta ja tuotekehitystä kehitetään.

## 1.1 Työn tausta

Opinnäytetyön toimeksiantaja on lahtelainen teknologiayritys Teknoware Oy. Yritys valmistaa joukkoliikennevälineiden valaistuselektroniikkaa ja kiinteistöjen turvavalaistusjärjestelmiä. Työssä suunnitellaan testausjärjestelmä ajoneuvopuolen tarpeisiin, sillä ajoneuvotuotteet ovat toiminnallisilta ominaisuuksiltaan monimutkaisempia kuin turvavalaisintuotteet. Ajoneuvotuotteista suurin osa menee ulkomaille kansainvälisille juna- ja linja-autovalmistajille, joilla on tiukat vaatimukset laitteiden toimittajille. Testausjärjestelmän suunnittelutyössä otetaan huomioon myös muiden osastojen tarpeet, koska testausta kehitetään yhtenäiseen koko yritystä palvelevaan suuntaan.

Yrityksen tarpeet tuotantotestauksen kehitykselle ovat peräisin tuotekehitysosastolta ja tuotannosta. Ajoneuvopuolen tuotteet suunnitellaan asiakasvaatimusten mukaan ja myös testauksen suunnittelusta on syntynyt kertaluontoista toimintaa. Kertaluontoisuuden vuoksi testauksen suunnitteluun hukataan runsaasti yrityksen insinööriresursseja, jotka voitaisiin hyödyntää uusiin tuotekehitysprojekteihin. Testauksen suunnittelu tapahtuu tuotteen suunnittelun jälkeen omana projektina. Tuotantotestauksen suunnitteluun, testilaitteiston ja testiohjelman ohjelmointiin sekä testausmekaniikan valmistukseen kuluu useita kuukausia.

Tuotannon lopputestauksen menetelmä ja ohjelmointiympäristö LabVIEW oli valittu Teknowarella ennen työn aloittamista. Testausmenetelmäksi valittu toiminnallinen testaus toimii parhaiten tuotannon lopputestausmenetelmänä, sillä yrityksen tuotekirjo on valtavan laaja ja tuotantovolyymit pieniä. Yrityksessä on selvitetty, että toiminnallinen testaus lisää testauksen kattavuutta muiden testien rinnalla.

## **1.2 Työn tavoitteet**

Opinnäytetyöllä oli kaksi päätavoitetta, tuotantotestauksen laadun kehittäminen ja tuotekehityksen nopeuttaminen. Tuotantotestauksen kehittämisessä lähtökohtana oli suunnitella testauslaitteisto, joka mahdollistaa erilaisten elektroniikkatuotteiden puoliautomaattisen tuotantotestauksen sekä parantaa testauksen laatua, tehokkuutta ja jäljitettävyyttä. Testauksen kehittämiseksi suunnitellaan uusi testausprosessi, joka keskittyy testin manuaalisten vaiheiden poistamiseen. Operaattorin suorittamat työvaiheet aiheuttavat prosessiin vaihtelua ja ovat testauksen laatuun vaikuttavia virhelähteitä (3, s. 30). Jäljitettävyyden nykyinen taso määritellään ja esitetään tapa, jolla tuotteiden ja testien jäljitettävyyttä kehitetään.

Tuotekehitysosastolla tehtävää tuotantotestauksen suunnittelua kehitettiin lähtökohdasta, jossa koko tuotantotestausjärjestelmä suunniteltiin alusta uusille tuotteille. Toimintatapa sitoi etenkin ohjelmistosuunnittelijoiden resursseja ja viivästytti uusien tuotekehitysprojektien aloittamista. Tähän pyrittiin löytämään ratkaisu kirjallisuuskatsauksen ja yrityksessä tehdyn kehittämistyön avulla.

Kirjallisuuskatsauksen keskeiset tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Mitkä ovat tuotantotestausjärjestelmän hyviä käytäntöjä toimeksiantajan kaltaisessa liiketoimintaympäristössä?
2. Miten tuotantotestaus tukee tuotekehitystä ja muuta liiketoimintaa?
3. Mitkä ovat alan yleiset jäljitettävyysskäytännöt ja miten ne toteutetaan?

## **1.3 Työn toteutus**

Opinnäytetyön käytännön osuus toteutettiin päivätöinä Teknowarella. Tuotekehitysosastolla työn etenemistä tuki tuotekehityspäällikkö sekä osaston elektroniikka- ja ohjelmistosuunnittelijat. Muut työtä edistäneet sidosryhmät olivat tuotanto, projekti-, after sales- ja mekaniikkaosastot. Tietotekninen ja automaatio-osaaminen projektiin hankittiin kolmannelta osapuolelta, testausjärjestelmien

ammattilaiselta. Kolmannen osapuolen tukea tarvittiin, koska testausjärjestelmien kehitys ei ole Teknowaren ydinosaa.

Opinnäytetyön päävaiheet olivat työhön perehtyminen, testilaitteiston valinta, tuotantoprosessin muutosten suunnittelu ja dokumentointi. Työhön perehtyminen sisälsi tuotekirjoon sekä yrityksen tuotantotestaukseen perehtymisen. Testilaitteiden valinnat tehtiin yhteistyössä kolmannen osapuolen kanssa. Tuotantoprosessiin tehtävistä muutoksista tehtiin päätökset tuotanto- ja suunnitteluhenkilöstön kanssa, jotta varmistuttiin muutosten toteuttamiskelpoisuudesta. Projektin viimeinen vaihe oli dokumentointi, jotta tuotantotestauksen kehittämisprojekti yrityksessä voi jatkua.

## 2 TESTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

### 2.1 Tuotantotestaus

Palokangas (4, s. 11 - 12) siteeraa Kokkomäkeä, jonka mukaan tuotantotestaus on tuotannollinen laadunvarmistusmenetelmä. Tuotantotestauksen tavoite on estää virheellisesti valmistettujen tuotteiden toimittaminen asiakkaille. Tuotantotestissä ei testata laitteen kaikkia ominaisuuksia, vaan sillä varmistetaan laitteen toiminta testaamalla määrätyt toiminnot. Tuotantotestaus toteutetaan mahdollisimman kattavasti, mutta kustannustehokkaasti. Yksityiskohtaisempi testaus tehdään tuotekehitysvaiheessa, jolloin varmistetaan kaikkien ominaisuuksien toimivuus. (4, s. 11 - 12.)

Elektronisten laitteiden tuotantoprosessiin sisältyy yleensä useita testaus- ja laadunvarmistusvaiheita, koska tuotantoprosessi saadaan harvoin virheettömäksi. Tyypillisesti piirilevyn komponenttien ladonnan jälkeen suoritetaan visuaalinen tarkistus joko automaattisella (AOI) tai manuaalisella (MVI) menetelmällä. Yleensä tehdään myös korttitestit (ICT) ja toiminnallinen lopputesti (FT). Korttitestissä testataan elektronista kokoonpanoa eli piirilevyä, johon on ladottu komponentteja. Tuotannon lopputesti tehdään valmiille koteloiduille tuotteelle. (5, s. 1 - 5.) Opinnäytetyön tuloksena syntyvällä laitteistolla tehdään korttitestejä ja toiminnallisia lopputestejä.

Testien ja tarkastusten määrä on riippuvainen siitä, kuinka monimutkaisia laitteita valmistetaan. Testien on luotava lisäarvoa tuotteille, tai muuten niiden suorittaminen ei ole kannattavaa yritykselle. Testaamisen lisäarvo tulee laadusta eli siitä, ettei asiakkaille toimiteta viallisia tuotteita. Testauksen onnistuminen riippuu monista tekijöistä, joista yksi on piirikortin monimutkaisuus. Piirikortin monimutkaisuutta tuotannon näkökulmasta arvioidaan eri mittareilla, kuten ladottujen komponenttien tai juotosten määrällä. Yleinen määritelmä monimutkaisuudelle on, että mitä vaikeampaa on saavuttaa hyvä tuotannon saanto ilman tarkistuksia tai testauksia, sitä monimutkaisempi piirilevykokoonpano on. Tuotannon saanto tarkoittaa viallisten ja toimivien laitteiden suhdetta. Saantoa mitataan tuotantotesteillä. (5, s. 1 - 5.)

Mittalaittevalmistaja Agilent Technologiesin määritelmässä yksinkertaisessa elektroniikkatuotteessa on 75 komponenttia, keskinkertaisessa 550 komponenttia ja monimutkaisessa 2 500 komponenttia (5, s. 3). Muita tuotannon onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat tuotantovolyymi verrattuna tuotevariaatioihin ja kaksipuolinen automaattinen ladonta. Etenkin suuri tuoteskaala ja pieni

tuotantovolyyymi nostavat vikojen mahdollisuutta. (5, s. 2 - 4, 6.) Verrattaessa Agilent Technologiesin määritelmää Teknowaren elektroniikkatuotantoon asetutaan yksinkertaisen ja keskinkertaisen monimutkaisuustason väliin komponenttien lukumäärässä. Teknowarella pieni tuotantovolyyymi, lukuisat tuotevariaatiot ja kaksipuolinen automaattinen ladonta tuovat lisähaasteen hyvän saannon saavuttamiseksi.

Tuotannon ladontaprosessin saanto on riippuvainen piirilevyn monimutkaisuudesta siten, että korkean monimutkaisuusasteen tuotteet ovat saannoltaan selvästi heikompia kuin yksinkertaiset tuotteet. Tämän vuoksi testaus- ja korjausstrategia tulee määrittää tuotteen monimutkaisuuden mukaan. Yksinkertaisessa testistrategiassa testi menee joko läpi tai se hylätään (go/no-go), minkä seurauksena kaikki vialliset tuotteet menevät suoraan hävikkiin ja hyväksytyt toimitetaan asiakkaille. (5, s. 2 - 5.)

Tuotannon saannon perusteella voidaan tehdä taloudellisia laskelmia toimintojen kannattavuudesta, kuten viallisten tuotteiden korjauksista. Jos yritys tuottaa 300 000 tuotetta vuodessa 95 %:n tuotannon saannolla, 15 000 tuotetta menee vuosittain hävikkiin. Tuotteen hinnan ollessa 50 euroa kappaleelta hävikki tulee maksamaan 750 000 euroa. Tällöin tuotteiden korjauksiin ja uudelleen testaukseen voidaan käyttää alle 750 000 euroa vuodessa, jotta se on taloudellisesti kannattavaa toimintaa. Testausta kehitettäessä voidaan verrata viallisten tuotteiden korjauskustannuksia testissä hylättyjen tuotteiden pois heittämisestä aiheutuneisiin kustannuksiin ja tarkastella testistrategioita. Oresjon (5, s. 4) mukaan matalan monimutkaisuusasteen testistrategiaksi sopii go/no-go-tyyppinen ratkaisu, jossa testissä hylättyjä tuotteita ei korjata. (5, s. 3 - 5.)

## **2.2 Toiminnallinen testaus**

Teknowaren elektroniikkatuotannon lopputestausmenetelmäksi on valittu toiminnallinen testaus, koska se täydentää hyvin tutkittua testauskattavuutta. Toiminnallisella testauksella tarkoitetaan testausta, jossa testisysteemi syöttää signaaleja testattavaan laitteeseen ja simuloi laitteen normaalia toimintaa tarkastaakseen laitteen suorituskyvyn (2, s. 403). Toiminnallisen testin tulos on luettavissa yksinkertaisesti hyväksytty/hylätty-muodossa. Haitta on, ettei vian tarkka juurisyy ilmene testituloksesta suoraan, vaan edellyttää tarkempaa testausta tai analysointia. Toiminnallisen testin suorituskkyä parannetaan lisäämällä testeriin mahdollisuus testata neulapedillä (bed-of-nails), kuten ICT-menetelmässä (In-Circuit Testing). Neulapedillä testaaminen edellyttää tuotekohtaisen fixturen eli testimekaniikan valmistamista. Verrattuna ICT-testaukseen, toiminnallisessa neulapetitestauksessa on vähemmän neuloja ja kontakti vain kriittisiin testipisteisiin. (2, s. 403.)

## 2.3 Testauskattavuus

Testauskattavuudella mitataan, kuinka suuri osa laitteen mahdollisista vioista on saatu testattua. Kattavuus ilmoitetaan yleensä mahdollisten ja löydettyjen vikojen prosentuaalisena suhteena. Elektroniikkatuotannon aikana tehdään erilaisia tarkistuksia ja testejä, jotta saavutetaan hyvä testauskattavuus eli varmistetaan laatu mahdollisimman hyvin. 100 %:n kattavuutta ei tavoitella, koska testausta suunnitellessa tehdään kompromissi laadun ja kustannusten välillä. Riittävän laatutason testauskattavuus on useimmilla aloilla alle 100 %. (6.)

Eri laadunvarmistusvaiheet, kuten optinen tarkastus (MVI/AOI), korttitestaus (ICT) ja toiminnallinen testaus (FT), pyritään suorittamaan siten, että ne kattavat testauksen eri osa-alueita. Jokaisessa vaiheessa ei ole järkevää testata kaikkia ominaisuuksia, sillä päällekkäisyydet testauksessa maksavat. Tämän vuoksi testaussuunnittelun aikana määritetään, mitä ominaisuuksia testataan milläkin menetelmällä. Hyvä testauskattavuus järkevillä kustannuksilla on toteutettavissa eri menetelmiä käyttäen. Puutteellinen testauskattavuus kasvattaa vian esiintymisen riskiä myöhemmässä vaiheessa, jolloin aiheutuu ylimääräisiä laatukustannuksia. Kuvassa 1 on havainnollistettu testauskattavuutta (fault coverage) tuotannon eri testaus ja tarkastusmenetelmien avulla. (5, s. 1 - 2.)

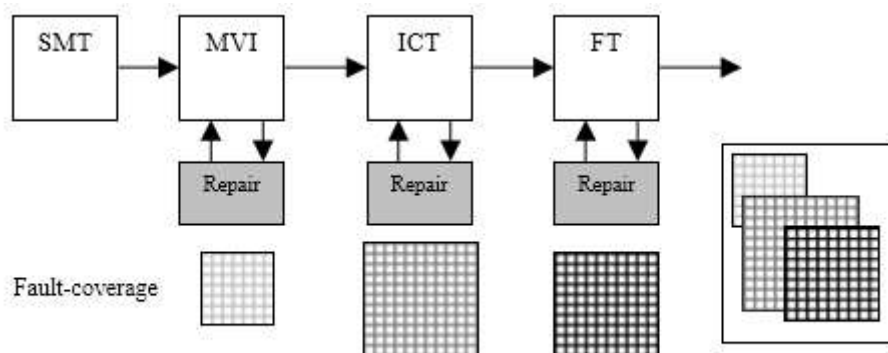


Figure 1

KUVA 1. Testauskattavuus (5, s. 1)

Tuotantotestauksen testauskattavuutta arvioidaan testimenetelmän kykyä löytää tuotannossa tulleet virheet. Arviointi tehdään yleensä pisteyttämällä virheet joko havaittaviksi tai ei havaittaviksi. Arviointi määrittää testimenetelmän hyvyden. Yksi testauskattavuuden määrittelymenetelmä on PCOLA/SOQ-taulukko (kuva 2). PCOLA tulee sanoista läsnäolo (presence), oikea osa (correct-

ness), suuntautuminen (orientation), toimivuus (live) ja kohdistus (alignment). SOQ taas tulee sanoista oikosulku (short), avoin piiri (opens) ja laatu (quality). Mainittua menetelmää käyttäessä tehdään taulukko, jossa arvioidaan kunkin osa-alueen testattavuutta testimenetelmän mukaan. Taulukon avulla arvioidaan testimenetelmän kykyä kattaa tietty osa-alue käyttämällä numeerisia arvosanoja. Arvosanoista lasketaan testimenetelmän kattavuusprosentti. (7.)

Is it Built Right?										Does it Work Right?
Fault Type Name	Presence	Correctness	Orientation	Live	Alignment	Shorts	Opens	Quality (of Solder)	Functional	
Fault Spectrum	P	C	O	L	A	S	O	Q	F	
Description	Is a part there?	Is it the right part?	In right direction?	Does part turn on?	Is part aligned properly?	Is part shorted?	Is part open?	Solder quality good?	Conforms to spec?	
Fault Class	Placement	Material	Placement	Material	Placement	Solder	Solder	Solder	Performance	

KUVA 2. PCOLA/SOQ-*taulukko* (6)

## 2.4 Testausjärjestelmä toiminnalliselle testaukselle

Elektroniikkatuotteiden testaukseen on olemassa valmiita testimekaniikan sisältäviä testilaitteistoja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Tällaisia ratkaisuja saa esimerkiksi Keysight Technologies -yhtiöltä. Testilaitteisto voidaan tilata ulkoiselta toimittajalta, mutta testijärjestelmän luomiseen tarvitaan usein yrityksen omaa tietotaitoa, jotta testilaitteisto sulautuu muuhun toimintaan ja se vastaa parhaalla mahdollisella tavalla yrityksen tarpeita. Teknowaren tapauksessa testausjärjestelmä on hajanainen eikä testien jäljitettävyydelle ole yhtenäistä käytäntöä. Yksi syy tähän saattaa olla se, että laitteistot on tilattu useilta eri toimittajilta yksittäisinä testausjärjestelminä.

Vuonna 2014 joukko eri yliopistojen tutkijoita esitti universaalin testausalustan piirilevyjen testaamiselle APEDE-konferenssissa (Actual Problems of Electron Devices Engineering). Yksi julkaisun lähtökohdista oli se, että testijärjestelmiä tuottavien yritysten laitteistot ovat kalliita hankkia ja edellyttävät kallista teknistä tukea käytön aikana. Tutkimuksessa kehitettiin universaali elektroniikkatuotteiden tuotantotestausjärjestelmä käyttäen National Instrumentsin komponentteja sekä graafista LabVIEW-ohjelmointikieltä. Komponentteina toimi National Instrumentsin PXI-kehikko ja siihen sopivat erilaiset PCI-moduulit (kuva 3), joilla testisignaaleja tuotetaan. Testinhallintaohjelmis-

toksi valittiin National Instrumentsin kehittämä TestStand. Testilaitteistoon tulevat komponentit valittiin siten, että resurssit soveltuvat yksinkertaisten ja monimutkaisten laitteiden testaamiseen. Laitteisto suunniteltiin useille erilaisille tuotteille. (2, s. 403 - 409.)



KUVA 3. National Instrumentsin PXI-kehikko PCIe-lisälaitteilla (8)

APEDE-konferenssijulkaisun tutkimuksessa syntyneessä universaalissa laitteistossa oli huomioitu, että tuotteista halutaan testata useita tuloja ja lähtöjä. Useiden tulojen ja lähtöjen testaus oli toteutettu adapterilla, joka sijaitsee fyysisesti testauslaitteiston ja testattavan tuotteen välissä. Tällaisesta adapterista käytetään myös nimeä "switching matrix", joka toteutetaan relekytkennöillä. (2, s. 404.)

Universaalin testilaitteiston keskeisimpiä komponentteja ovat PXI-kehikko moduuleineen ja ohjelmoitavat tehonlähteet. Tehonlähteeksi valittiin ulkoinen versio järjestelmään sulautetun version sijasta, koska ulkoiset tehonlähteet ovat yleensä monipuolisempia tehon, jännitealueen ja paremman oikosulkusuojan vuoksi. Kehikko ja siihen tulevat moduulit valittiin sen mukaan, mitä laitteistolla halutaan testata ja millaisia vaatimuksia testiasemalle on. Pelkästään National Instrumentsilla moduuleja erilaisiin kehikoihin on tarjolla useita satoja. Testilaitteiston ja testattavan tuotteen välisen rajapinta toteutetaan usein suunnitteleamalla moninapainen liitin (mass interconnect) ja ohjauskiskot testifixturea eli mekaniikkaa varten. Etuna moninapaisessa liittimessä ja standardisoidussa fixturen kiinnityksessä on, että testilaitteistoa voidaan käyttää useille eri tuotteille valmistamalla tuotekohtaisia testifixtureita. (2, s. 403 - 409.)

APEDE-konferenssijulkaisun lopussa vertailtiin kahta testiasemaa yrityksessä nimeltä Control Techniques. Vertailussa käytettiin yrityksen nykyistä testiasemaa ja tutkimuksessa syntyneitä



universaalia LabVIEW-testiasemaa. Testilaitteilla testattiin täysin samat tuotteet sekä ominaisuudet. Universaalilla LabVIEW-testiasemalla testatun tuotteen tuotantokapasiteetti nousi 39 % verrattuna nykyiseen testilaitteistoon. Tutkimuksessa onnistuttiin nopeuttamaan testisykliä huomattavasti, mutta testauskattavuuden paranemisesta ei ole esitetty tuloksia. Kehitetyn testilaitteiston lähtökohtana oli, että laitteiston täytyy tarjota tarpeeksi resursseja kattamaan toiminnallisuudeltaan yksinkertaisten ja monimutkaisten tuotteiden testaus. (2, s. 408 - 409.)

National Instrumentsin komponentit ja ohjelmistot ovat erittäin käytettyjä tuotantotestausjärjestelmissä. Laineen ja Aholan opinnäytetöistä käy ilmi, että mittausjärjestelmiä valmistava Vaisala Oy ja ajoneuvoelektroniikkaan keskittyvä Vansco Electronics Oy hyödyntävät National Instrumentsin kehittämiä ohjelmistoja testaussovelluksissaan (9, s. 26; 10, s. 3).

#### **2.4.1 Tuotekehityksen haasteet testauksessa**

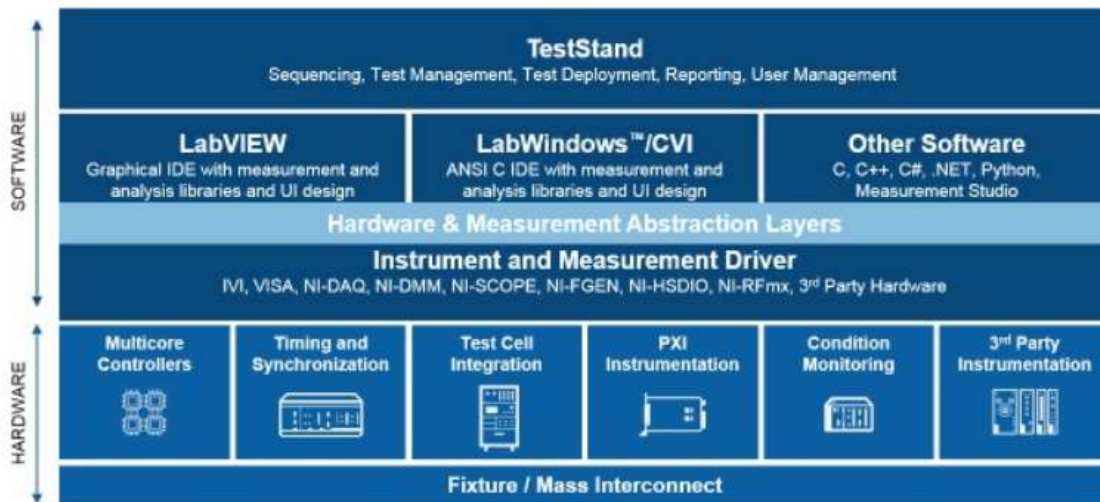
Monet nykypäivän elektroniset laitteet ovat huomattavasti monimutkaisempia kuin aiempina vuosikymmeninä. Laitteiden monimutkaisuus on verrannollinen niiden testauksen suunnitteluun ja kustannuksiin. Testilaitteilta tarvitaan edistyneisempiä toimintoja kuin aiemmin, joka on seurausta tuotteiden monimutkaistumisesta. Teknologiakehitys on mahdollistanut elektronisten tuotteiden valmistuskustannusten merkittävän laskun, mutta testauksen kustannukset eivät ole kehittyneet samaan suuntaan siksi, että testausjärjestelmät vaativat arvokkaita instrumentteja ja aiempaa enemmän suunnittelua. (1.)

Nykypäivän tuotekehityksen haasteita elektroniikkatuotteiden testauksessa ovat tuotteiden monimutkaisuuden kasvu, laaja tuotekirjo, nopea tuotekehitysprosessi ja budjettien pientyminen testauskustannusten noustessa. Erityisesti nopealla tuotekehityksellä yritykset pysyvät kilpailukykyisenä ja voivat vastata markkinoiden kysyntään. Nämä haasteet pakottavat yritykset luopumaan yksittäisille tuotteille suunnitelluista testausjärjestelmistä, jotka ovat hitaita kehittää ja hankalia muokata uusille tuotteille soveltuviksi. Tuotespesifien testausjärjestelmien sijaan testauksessa siirytään modulaarisiin ohjelmistopohjaisiin testausjärjestelmiin, joihin voidaan lisätä uusia ominaisuuksia ja laitteita tarpeiden mukaan. (1.)

#### **2.4.2 Tuotekehitystä tukeva testausjärjestelmä**

Ohjelmistopohjainen testiarkkitehtuuri erottaa ohjelmiston ja laitteiston eri kerroksiin, mikä mahdollistaa ohjelmiston ja testi-instrumenttien hyvän muokattavuuden. Muokattavuutta lisätään erottamalla testien kehitysympäristö ja testinhallintaohjelmisto toisistaan. Tällaista ohjelmistopohjaista

testijärjestelmää kuvaa hyvin National Instrumentsin kehittämä testiarkkitehtuuri, joka koostuu erilaisista laitteistoista ja kahdesta erillisestä ohjelmistosta (kuva 4). Ohjelmistoina on käytetty National Instrumentsin kehittämää LabVIEW- ja TestStand-ohjelmistoja. Erillisen TestStand-testinhallintaohjelmiston etu on, että sillä voidaan suorittaa useita eri testikoodeja, kuten LabVIEW-, C++- tai Python-koodeja ja koota niistä yksi testisekvenssi. Tämä mahdollistaa aiemmin tehtyjen testikoodien ja uusien koodien yhdistämisen. (1.)



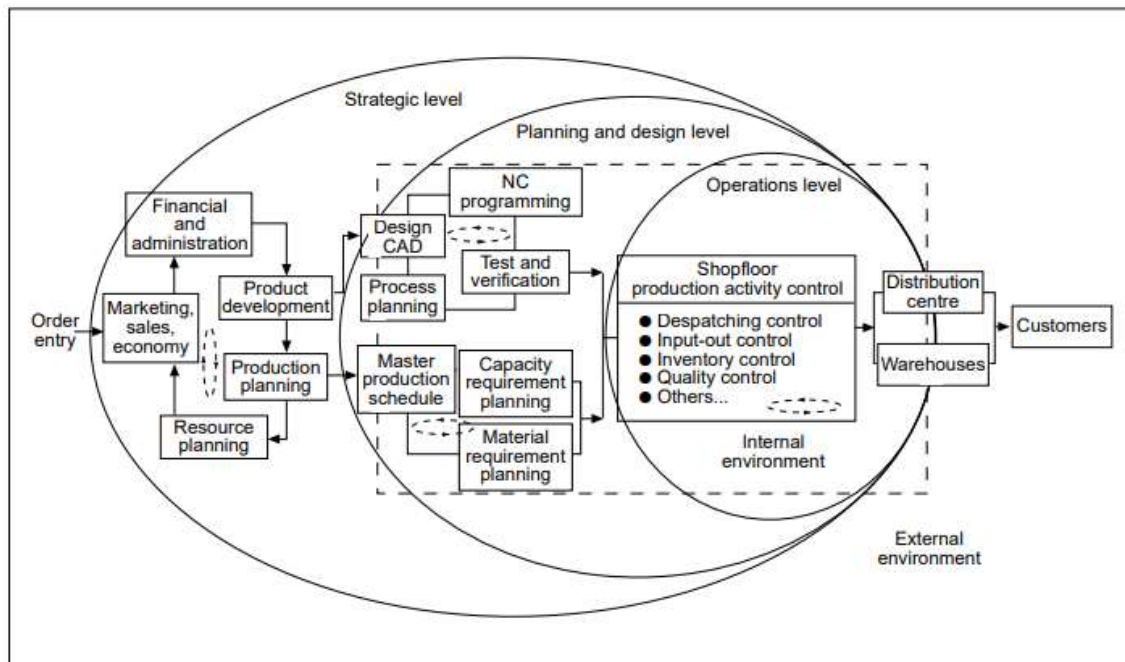
KUVA 4. National Instrumentsin ohjelmistopohjainen testiarkkitehtuuri (1)

Kuvassa 4 esitetty testiarkkitehtuuri tarjoaa tuotekehitykselle ja testien suunnittelijoille monia etuja. Testausjärjestelmän joustavuus kasvaa ja siihen voidaan tarvittaessa lisätä uusia toimintoja ja teknologioita. Järjestelmä on helposti skaalautuva ja muokattavissa tuotekehityksen ja tuotannon tarpeiden mukaan. LabVIEW- ja TestStand-ohjelmistojen ansiosta samoja testikoodeja ja laitteita voidaan käyttää uudestaan eri tuotteille. Tämä pienentää testien kehityskustannuksia ja testilaitteisiin kohdistuvia investointeja. Laitteisto koostuu erillisistä instrumenteista ja se pienentää koko laitteiston vanhentumisen riskiä. Tähän vaikuttaa paljon myös LabVIEW-ohjelmiston laaja valmistajatuki, mikä mahdollistaa eri valmistajien laitteiden käytön. (1.)

## 2.5 Jäljitettävyys

Jäljitettävyys käsitteenä sai nykyisen muotonsa, kun sitä alettiin käyttää ISO 9001/BS5750 -laatustandardissa. Tällöin jäljitettävyys oli määritelty kyvyksi löytää suoritettut vaiheet ja varmistaa, että tietyt tapahtumat ovat suoritettu. Jäljitettävyys on informaatiopolku, joka seuraa tuotteen fyysisistä polkua (11, s. 4). Nykyään jäljitettävyys terminä ymmärretään laajemmin ja se ylettyy tuotantojärjestelmän eri osa-alueisiin (kuva 5). Nämä osa-alueet ovat strategia, suunnittelu ja toteutus

sekä operaatiot. Täydellinen jäljitettävyyden edellyttää tilan (status), suorituskyvyn (performance) ja tavoitteen (goal) jäljitettävyyttä. Tilan jäljittäminen tarkoittaa, että saadaan tietoa nykytilanteesta. Suorituskyvyn jäljittämällä halutaan verrata saavutuksia ja suoritusta suunniteltuihin tavoitteisiin. Tavoitteen jäljitettävyydellä tarkoitetaan suorituskyvyn arviointia tavoitteiden valossa. Näitä kolmea jäljitettävyyden tasoa suositellaan käytettäväksi tuotantojärjestelmän kolmella eri osa-alueella. (12, s. 4.)



KUVA 5. Tuotantojärjestelmän rakenne (12, s. 5)

Chengin ja Simmons (12, s. 4 - 5) mukaan jäljitettävän tiedon määrä on oleellinen asia ja on tärkeää kerätä merkityksellistä tietoa prosesseista. Keräämällä liikaa tietoa aiheutetaan tarpeettomia kustannuksia ja hankaloitetaan prosessia ilman suurta hyötyä. He mieltävät jäljitettävyyden enemmän kustannuksia aiheuttavaksi kuin lisäarvoa tuovaksi toiminnoksi. (12, s. 4 - 5.)

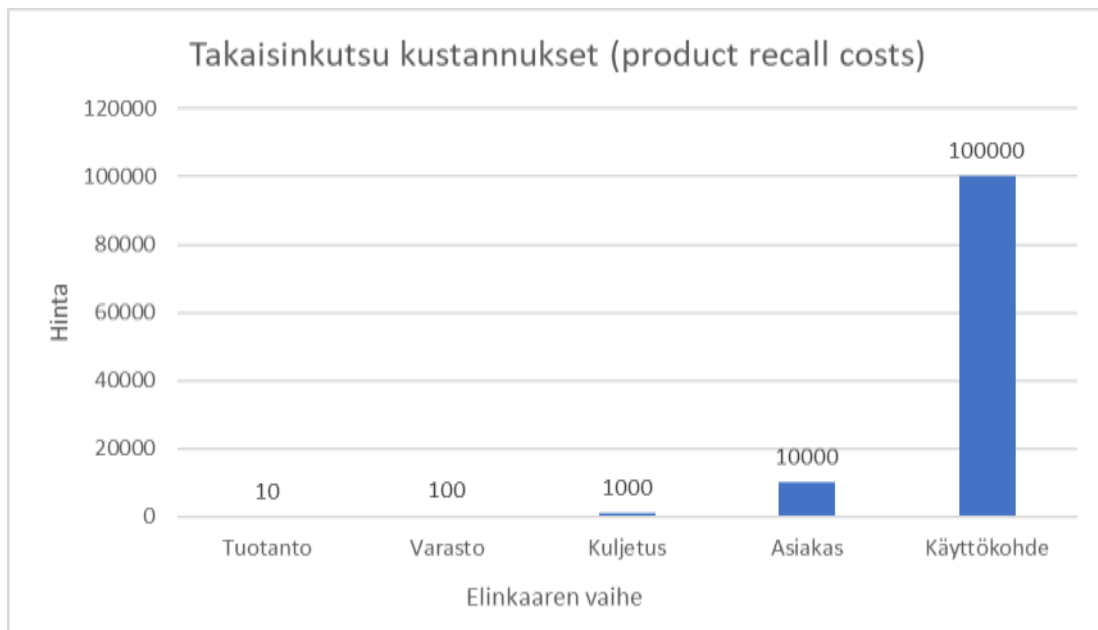
ISO 9001:2015 -laatustandardi määrittelee tuotettujen tuotteiden jäljitettävyyden seuraavasti:

*Organisaation on yksilöitävä tuotokset sopivin keinoin, kun se on tarpeellista vaatimuksenmukaisuuden varmistamisen kannalta. Organisaation on tunnistettava tuotosten tila seuranta- ja mittausvaatimusten suhteen kaikissa tuotteen ja palvelun tuottamisvaiheissa. Jos tuotteen edellytetään olevan jäljitettävissä, organisaation on hallittava yksittäisten tuotosten tunnistettavuutta ja säilytettävä jäljitettävyyden mahdollistavaa dokumentoitua tietoa. (13, s. 25.)*

Merkittäviä tarpeita jäljitettävyyden kehittämiseksi ovat toimitusketjun hallinnan parantaminen, tuotteiden laadun ja turvallisuuden varmistaminen, riskien pienentäminen ja operatiivisen tehokkuuden parantaminen. Taloudellisia hyötyjä saavutetaan pienemmillä jakelukustannuksilla ja palautuksien sekä takaisinkutsujen vähentymisellä. Mitä suuremmat toimitusketjun kustannukset yrityksellä on, sitä enemmän se saa hyötyä hyvästä jäljitettävyydestä. Jäljitettävyyden hyötyyn vaikuttaa myös laatuongelmien todennäköisyys yrityksen tuotteissa. (11, s. 4 - 8; 14) Jäljitettävyyden hyötyjä ovat seuraavat:

- tuotteiden rajatut takaisinvedot mahdollisia
- tuotekohtaisen informaation jakaminen viranomaisille ja asiakkaille
- asiakkaiden turvallisuuden parantuminen viallisten tuotteiden poistamisen myötä
- toimitusketjun hallinnan parantuminen
- yrityksen maineen parantuminen
- asiakkaan luottamuksen kasvu
- liiketoiminnan palautuminen merkittävän reklamaation jälkeen. (14; 15.)

Kun tuotteet pystytään jäljittämään niiden sijainnin perusteella, säästetään merkittävästi kustannuksia sillä, että havaittaessa virhe tuote lukitaan ja sen eteneminen estetään toimitusketjussa. Taloudellisesti tällainen tuotteen lukitseminen on kannattavaa, koska tuotteen takaisinkutsu kustannukset voivat jopa kymmenkertaistua jokaista tuotteen elinkaaren vaihetta kohden (kuva 6). Kymmenkertaistuminen ei päde täsmällisesti työn tilaajan toimintaympäristössä. On kuitenkin selvää, että kannattavampaa on hakea viallinen tuote pois omasta varastosta kuin asiakkaalta. (16.)



KUVA 6. Takaisinkutsu kustannukset tuotteen elinkaaren eri vaiheissa

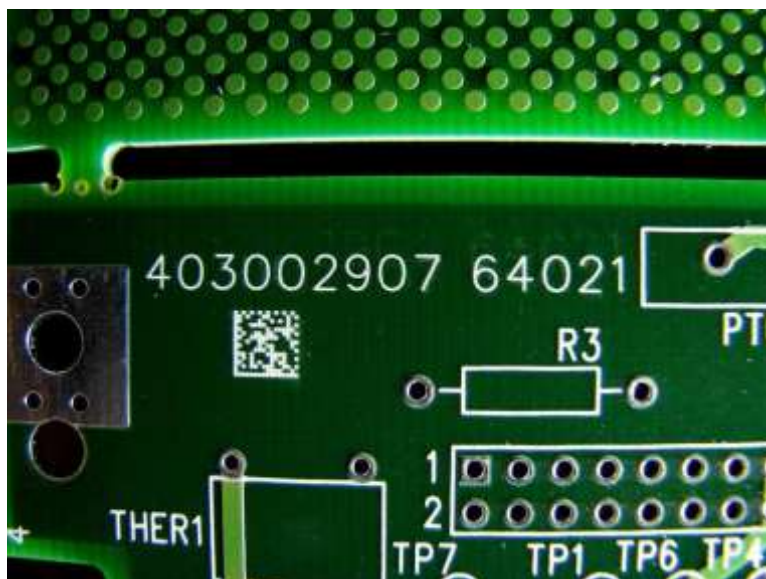
Teknisen kehityksen myötä tuotteiden jäljitettävyyttä voidaan luoda ilman fyysisiä dokumentointia ja varmuuskopioita. Yksilölliset tunnistimet ja jäljitettävyyttä luodaan helposti jonkin olemassa olevan prosessin sivutuotteena. Jäljitettävä informaatio siirretään automaattisesti sellaiseen kohteeseen, josta sitä tullaan tarvittaessa käyttämään. (17, luku 2.) Teknowaren tapauksessa prosessit, joiden sivutuotteena jäljitettävyyttä voidaan luoda ovat tuotantotestaus ja piirikortin ladontaprosessi. Tuotantotestauksen yhteydessä testitulokset tallentuvat verkossa olevaan tietokantaan, josta ne löytyvät myöhemmin. Ladontaprosessi on edistyskäsien vaihtoehto, koska silloin voidaan jäljittää myös tuotteeseen käytetyt komponentit.

Electronics Manufacturing Services -yritys (EMS) on yritys, joka suunnittelee, valmistaa, jakelee ja tarjoaa huoltopalveluita elektroniikkakomponenteille. EMS-yritykselle jäljitettävyyttä tarkoittaa sitä, että tuotannon prosessit voidaan jäljittää alkaen piirilevyaihiosta päättyen pakkaamiseen. Tällöin jäljitettävää tietoa on tuotteisiin käytettyjen materiaalien tiedot. Elektroniikkatuotannossa tärkeitä jäljitettäviä prosesseja ovat ladontaprosessit, testaukset ja tarkistukset, korjaukset sekä kokoonpano. Ladontaprosessista halutaan jäljittää käytetyt komponentit ja testauksista testitulokset. Kun tämän tason jäljitettävyyttä aletaan implementoida yrityksen toimintaan, on otettava huomioon teknologiset prosessit, käytettävissä oleva tila tunnistimelle, tuotantovolyymi ja implementoinnin kustannukset. (18, s. 585 - 588.)

### 2.5.1 Yksilöllinen tunnistus

ISO 9001:2015 -standardin mukaan organisaation on hallittava yksittäisten tuotosten tunnistettavuutta (13, s. 25). Tällöin on luotava yksilöllinen tunnistus jokaiselle tuotetulle tuotteelle ja kyettävä seuraamaan toimitusketjua. Muun muassa lento-, auto- ja lääketeollisuudessa jäljitettävyyden on sekä laillinen että moraalinen vaatimus. Näillä ja samankaltaisilla aloilla on selvää, että tuotteiden tulee olla jäljitettävissä saumattomasti sen alkuperään ja testausversioon. (17, luku 3.) Teknowaren tuotteita menee sekä linja-auto- että junateollisuuden käyttöön, mutta vain osalle tuotteista luodaan yksilöllinen tunnistus perustuen asiakasvaatimukseen.

Yksilöllisen tunnistuksen merkitsemiseen on erilaisia vaihtoehtoja. Tunnistus voidaan merkitä esimerkiksi tarraan tai suoraan tuotteeseen. Paljon käytettyjä tunnistuksia ovat 1D- ja 2D-koodit. 2D-koodia käytetään piirikorteissa pienen koon vuoksi (kuva 7). Etäluettavia RFID-tunnistuksia on saatavissa piirilevyille ladottavana komponenttina ja tulostettavana tarrana. Merkittävä haaste on usein tunnistukselle varattu tila tuotteessa. Esimerkiksi tarrat ja RFID-tunnistukset voivat olla liian suuria pienille tuotteille. Varmistuaikseen sopivasta merkintätavasta teknologian valinnassa täytyy huomioida materiaali, käyttötarkoitus, merkintäpinta, tunnistuksen koko ja merkinnän laatu. Suorat merkintätavat ovat varmin menetelmä, kun halutaan merkinnän kestävän koko tuotteen elinkaaren ajan. Suoria merkintöjä ovat esimerkiksi laser ja mustesuihku. Tuotteen tunnistuksen suora merkintä on suosittua auto-, lento- ja elektroniikkateollisuudessa. Suora merkintä on luotettava tapa, koska se ei kulu tai irtoa. (19, s. 1.)



KUVA 7. 2D-koodi piirilevyssä (20)

## **2.5.2 Tuotteen elinkaaren hallinta**

Tuotteen elinkaaren hallinnasta käytetään kirjallisuudessa lyhennettä PLM (Product Lifecycle Management). PLM-systeemille on kirjallisuudessa useita eri määritelmiä sen mukaan, miten laajana kokonaisuutena sitä katsotaan. PLM-systeemi sisältää tuotteen elinkaaren aikana syntynyttä informaatiota suunnittelusta, valmistuksesta, käyttöönotosta ja kunnossapidosta tuotteen lopulliseen hävitykseen saakka. Tärkeää tietoa on myös tuotteen elinkaaren aikana tehdyt muutokset ja niiden syyt. PLM-ohjelmistolla tarkoitetaan ohjelmistoa, jossa kaiken tämän informaation hallinnointi ja käyttäminen on mahdollista. Yhdysvaltojen hallituksen alainen tutkimusryhmä The National Institute of Standards and Technology (NIST) määrittelee, että PLM on strateginen liiketoimintatapa yrityksen henkisen ja älyllisen pääoman tehokkaaseen hallintaan ja käyttöön. Määritelmä ei luo kovin täsmällistä kuvaa siitä, mikä PLM käytännössä on. PLM ei ole pelkästään tukiohjelmisto tuotekehitykselle, vaan myös merkittävää pääomaa yritykselle ja sen käyttö tukee useita organisaation osastoja. (17, luku 2.)

PLM-strategiaa pidetään projektijohtamisen yhtenä tärkeänä peruseriaatteena. Mikäli projekti-päälliköillä ei ole selkeää ymmärrystä ja pätevyystasoa tuotteen elinkaaren hallinnan käytännöistä yrityksessä, ei voida olettaa tuotteen elinkaaren hallinnan olevan täydellistä ja vastaavan yrityksen määritelmää tuotteen elinkaaresta. Projektien onnistumisen kannalta tuotteen elinkaaren hallinnan ja sen vaatimusten ymmärtäminen on ensiarvoisen tärkeää. PLM vaikuttaa tuotantotestaukseen siten, että laatuajattelu on osa tuotteen elinkaaren hallinnan suunnittelua. Tuotekehitysprojektiin sisällytetään laadunvarmistussuunnitelma, jossa määritellään, miten tuotteen laatua mitataan. Suunnitelmalla varmistetaan, että toimitetut tuotteet toimivat loppukäyttäjällä vaatimuksen mukaan ja ovat sekä kestäviä että luotettavia. Tuotantotestauksen tarkoitus on varmistaa tuotannon laatu siten, että tuotetut tuotteet vastaavat määriteltyä laatutasoa. (21, luku 2.)

## **2.6 Testauskeskeinen suunnittelu**

Design for Testing (DFT) eli testauskeskeinen suunnittelu on menetelmä, joka sisällytetään tuotteen suunnitteluun. DFT:llä pyritään huomioimaan tuotteen testaus aikaisessa suunnitteluvaiheessa ja näin helpottamaan testauksen toteuttamista myöhemmin. DFT-prosessissa tehdään yleensä yhteistyötä tuotantohenkilöstön ja eri suunnitteluosastojen välillä. Sulauttamalla DFT-prosessi tuotekehitykseen säästetään resursseja ja rahaa testauksessa sekä tuotekehityksessä. DFT vaikuttaa myös testauskattavuuteen, sillä tutkimusten mukaan testatessa piirikortteja ICT-menetelmällä ilman DFT:tä 20 % - 40 % piirikortin sisäisistä toiminnoista jää testaamatta. Tällöin hyvälläkin

ICT-testillä havaitaan vain 60 % - 80 % mahdollisista vioista. Vikojen havaitseminen koskee myös piirilevyjen toiminnallista lopputestausta, ja ilman testaussuunnittelua lopputestaushjelman suunnittelu ja testaaminen voi aiheuttaa ajallisia ja taloudellisia haasteita. DFT-määritelmän perusajatus on, että testaus huomioidaan tarpeeksi varhaisessa vaiheessa. Jos testaussuunnittelu tehdään muun suunnittelun jälkeen, testauksen kannalta oleelliset päätökset ovat jo tehty ja niiden muuttaminen on monimutkaista ja aikaa vievää. (22, s. 35 - 39.)

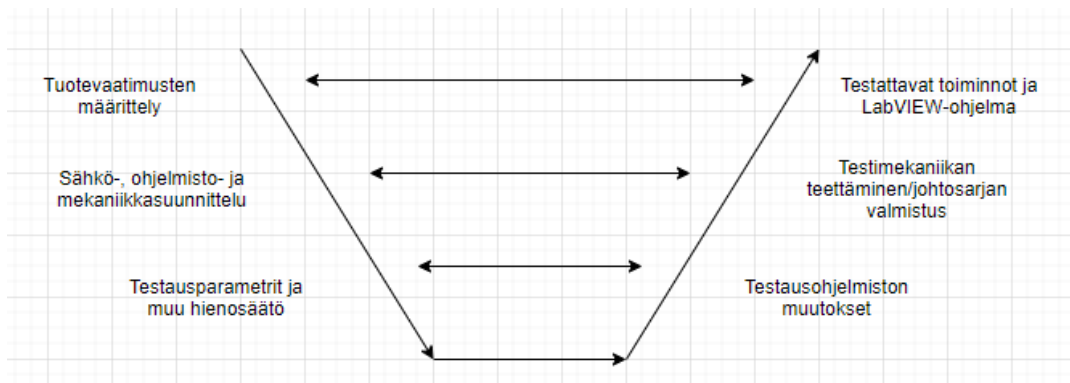
Lähtökohtana testaussuunnittelussa on, että kaikki tarvittavat toiminnot on mahdollista testata. Jos kaikkia testattavia toimintoja ei oteta huomioon, saatetaan suunnittelun jälkeen huomata jonkin tärkeän toiminnon testaaminen mahdottomaksi tai erittäin haasteelliseksi. Markkinoilla ilmenevän vian riski kasvaa, kun joku toiminnoista jää testaamatta. Viat johtavat asiakkaiden tyytymättömyyteen ja taloudellisiin menetyksiin. (22, s. 37 - 38.)

Suunnitteluvirhe tuotteessa on huomattavasti kalliimpi kuin tuotantovirhe, koska suunnitelmassa tehty virhe monistuu jokaiseen tuotteeseen ja tuotantovirhe vain muutamiin tuotteisiin tai tuotantoon. DFT-analyysi suunnitteluprosessin aikaisessa vaiheessa tiivistää osastojen välistä toimintaa suunnittelun ja tuotannon välillä ja lyhentää läpimenoaikaa sekä tuotekehityksessä että tuotannossa. (22, s. 38.)

Testaussuunnittelun tärkeydestä haastateltiin Teknowaren ajoneuvotuotekehityksen projektijohtajalle. Haastattelun perusteella liittämällä DFT-ajattelu suunnitteluprosessiin tehostetaan tuotekehitystä ja testausta pitkällä aikavälillä. Nykypäivänä testauksen suunnittelu on hyvin irrallista muusta suunnittelusta. Testauksen huomioiminen aikaisin suunnittelun yhteydessä, pienentää siihen käytettyä aikaa myöhemmin. Teknowarelle sopiva DFT-prosessi kehitetään yhdessä suunnittelijoiden, tuotannon ja projektipäälliköiden kesken. (23.)

DFT:n keskiössä voidaan pitää uutta testauslaitteistoa ja sen ominaisuuksia ja suunnitella tuotteet testilaitteistoa ja testaamista varten. Tällöin myös testilaitteistosta saadaan enemmän hyötyä, kun sen tuomat mahdollisuudet huomioidaan testauksen suunnittelussa. Yksi DFT-toimintamalli on ohjelmistoprojekteissa käytetty iteratiivinen V-malli, jossa testausta suunnitellaan tuotesuunnittelun kanssa samanaikaisesti. V-projektimalli on sovellettu Teknowaren tuotekehitysprosessiin kuvassa 8. (23.)





KUVA 8. Sovellus V-projektimallista

## 2.7 Valmistuskeskeinen suunnittelu

Design for Manufacturing (DFM) eli valmistuskeskeinen suunnittelu tarkoittaa, että suunnitteluprosessin aikaisessa vaiheessa huomioidaan valmistuksen kannalta oleellisia asioita. Tavallisesti yrityksissä on erilliset osastot suunnittelulle ja valmistukselle. Suunnittelun ja valmistuksen välissä on usein henkilökuntaa tuotteiden tuotannollistamista varten, joiden tehtävä on optimoida tuotannon prosessit ja saada tuotanto toimimaan tehokkaasti. Usein tuotannollistamisvaiheessa ilmenee suunnitteluun liittyviä ongelmia, joihin täytyy tehdä muutoksia toimivan tuotannon vuoksi. (24, s. 505 - 506.)

Kun tuote on suunniteltu ja sen ominaisuuksia muutetaan, saattaa aiheutua merkittäviä viivästyksiä tuotteen julkaisussa. Tuotteen rakenteellisten ja muiden ominaisuuksien muuttaminen on myös kalliimpaa, mitä myöhemmin tuotteen elinkaareissa ne tulevat ilmi. Muuttaessa valmiin tuotteen ominaisuuksia on huomioitava muutosten vaikutukset, jolloin joudutaan mahdollisesti muuttamaan useaa ominaisuutta. Valmistus on huomioitava tuotteen suunnitteluprosessin aikaisessa vaiheessa. Valmistuksen systemaattinen huomioiminen johtaa tutkitusti lyhyempiin tuotannollistamisaikoihin, jolloin tuotteet saadaan nopeasti markkinoille. Lisäksi tiivis yhteistyö tuotteen kehitysvaiheessa suunnittelun, tuotannon ja tuotannollistajien välillä johtaa säästöihin tuotantoprosessissa. Tuotannossa työskentelevät tuotantotekniikan ammattilaiset ymmärtävät paremmin käytännön toimet ja näkevät selkeämmin suunnittelun vaikutukset valmistukseen. (24, s. 505 - 506.)

## 2.8 Yhteenveto

Teknowaren tuotantotestausjärjestelmää kehitetään uudella testausjärjestelmällä. Nykypäivän tuotekehitystä tukeva testausjärjestelmä muodostetaan ohjelmistopohjaisella ratkaisulla, koska se on joustava (kuva 4). Tuotantotestausjärjestelmissä on käytetty paljon National Instrumentsin

LabVIEW- ja TestSand-ohjelmistoja ja laitteita. Joustavalla testisysteemillä päästään eroon kerta-luontoisesta testaussuunnittelusta ja säästetään aikaa tuotekehityksessä. Samaa testilaitteistoa voidaan käyttää useille tuotteille, kun se kattaa tuotekirjon tarpeet ja on muokattavissa rajapinnoilla, kuten testifixtureilla ja adaptereilla. Systeemillä pienennetään tuotantotestauksen suunnittelukustannuksia ja kasvatetaan testauksen kannattavuutta. Erityisesti mahdollisuus testata erilaisia tuotteita ja lisätä uusia tuotteita samalle laitteistolle, tekevät joustavasta testisysteemistä kannattavan Teknowarelle.

Testaus on laadunvarmistusmenetelmä ja siitä on jäätävä jälki, jotta tuote voidaan tarvittaessa todistaa testatuksi. Testaaminen ilman testitulosten tallentamista on jossain määrin turhaa. Teknowarella testien ja tuotteiden jäljitettävyyttä parannetaan, kun luodaan jokaiselle tuotteelle tuotannon aikana yksilöllinen tunniste. Tunnisteen avulla testitulokset yksilöidään tuotekohtaisiksi. Toimintatapa on selkeä parannus siitä, että tuotteilla on vain päivämäärä- tai työkohtainen tunniste. Jäljitettävyyden kehittämisessä on tärkeää, että yrityksessä tiedetään tavoiteltu taso. Turhan tiedon kerääminen aiheuttaa kustannuksia, mutta ei luo lisäarvoa. Teknowarella oleellista jäljitettävää tietoa on tällä hetkellä tuotantotestien tulokset ja tuotteen käyttökohde. Vaikka komponenttitason jäljitettävyys on alalla yleinen käytäntö, sen tuoma lisäarvo täytyy silti määrittää yrityskohtaisesti. Jos tuotteissa käytetyt komponentit halutaan jäljittää, on tehtävä seuraavat toimet:

- komponenttikelojen yksilöllisen tunnisteen luominen
- komponenttikelojen tunnisteen syöttäminen ladontakoneelle
- tuotteen yksilöllisen tunnisteen merkitseminen piirilevyyn ladonnan aikana
- komponenttikelojen ja tuotteen tunnisteen yhdistäminen toisiinsa.

Yksilöllisen tunniste kannattaa luoda suoralla merkinnällä, koska se on kestävä ja luotettava. Teknowarella muutama tuoteeseen poltetaan laserilla 2D-koodi ladonnan aikana. Koodin merkkämisestä kannattaa luoda toimintamalli kaikille tuotteille. Se antaa mahdollisuuden siirtyä tarvittaessa jäljittämään komponentteja.

Testaussuunnittelun lähtökohtana voidaan pitää tuotteen elinkaarta. Tällöin tavoiteltu laatutaso ja testauksen kattavuus määritellään projektin johtotasolla, kun tiedetään mitä tuotteelta halutaan ja miten laatu varmistetaan. Kun testauksessa tavoiteltu taso on määritelty, voidaan aloittaa testauksen suunnittelu. Testauksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon eri testien kattavuus ja määrittää testausstrategia. Testauksien määrä ja kattavuus on järkevää määrittää tuotteen monimutkaisuus-

den mukaan. Testisstrategiaa voidaan muuttaa tuotannon aloittamisen jälkeen, kun tuotteen saantoa saadaan mitattua testauksen avulla. Testauskattavuuden arviointi tapahtuu tuotekehityksessä, missä voidaan käyttää apuna valmiita kattavuuden arviointitaulukoita.

DFT- ja DFM-menetelmien käyttö tuotekehityksessä on tutkitusti kannattavaa ja vähentää testauksen ja valmistuksen kustannuksia. Menetelmiä käyttämällä testaus ja valmistus huomioidaan tuotesuunnittelun alkuvaiheessa, jolloin tuotetta kehitetään testauksen ja valmistuksen ehdoilla. Näin tehdään testauksen suunnittelusta sujuvaa ja testauksesta tehokasta. Menetelmät myös tiivistävät osastojen välistä yhteistoimintaa. Teknowaren nykyisessä tuotekehitysprosessissa testauksen suunnittelu tapahtuu omana projektina tuotesuunnittelun jälkeen.

### 3 TESTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU TEKNOWARE OY:LLE

Tässä osiossa käydään läpi työn käytännön osuuden suorittaminen. Työn aikana valittiin testauslaitteisto yhdessä kolmannen osapuolen kanssa. Työn suorittamisen päävaiheet olivat työn tilaajan asettamien vaatimusten määrittäminen, laitteiston valinta, testausprosessin muutosten suunnittelu ja dokumentointi. Työtä tehtiin tuotekehitysosastolla ja tiiviissä yhteistyössä tuotannon kanssa.

#### 3.1 Testattavien tuotteiden määrittäminen

Testilaitteiston vaatimusten määrittely alkoi valitsemalla testattavat tuotteet. Teknowarella on satoja erilaisia asiakasräätelöityjä tuotteita, joten oli välttämätöntä määrittää uuden testilaitteiston kannalta oleelliset tuotteet. Kaikkia vanhoja tuotteita ei otettu huomioon testilaitteiston suunnittelussa, sillä osaa laitteista valmistetaan vain kymmeniä tai satoja niiden elinkaaren aikana. Tällaisten tuotteiden testauksen kehittämiseen ei ole järkevää käyttää resursseja, koska niitä valmistetaan todennäköisesti vain varaosiksi. Varaosia valmistettaessa tuotantoerät ovat usein pieniä. Testilaitteiston suunnittelussa otettiin huomioon haasteita aiheuttaneet monimutkaisemmat tuotteet ja suunnitteilla olevat tuotteet. Yhdessä tuotekehitysosaston kanssa pohdittiin myös tulevien tuotteiden mahdollisia ominaisuuksia. Tuotekirjon läpikäynnin jälkeen tärkeimmiksi tuotteiksi määritettiin ajoneuvopuolen tuotteet, joissa on paljon erilaisia toimintoja, kuten useita lähtöjä ja tuloja sekä erilaisia tiedonsiirtoväyliä. Tällaisia tuotteita ovat esimerkiksi ajoneuvojen sisävalaistuksen ohjausyksiköt, joilla nimensä mukaisesti ohjataan ajoneuvojen sisävalaistusta.

#### 3.2 Tuotevaatimukset

Teknowaren käyttämä ISO 9001: 2015 -standardi määrittää, että tuotteita on testattava asianmukaisella tarkkuudella, jotta ne täyttävät määrättyt hyväksymiskriteerit (13, s. 25). Standardi ei määritä tarkasti testattavia toimintoja, joten asianmukainen tarkkuus ja testattavat toiminnot määrittelee tuotteiden valmistaja. Tuotteiden asettamat vaatimukset testilaitteistolle selvitettiin perehtymällä tuotteiden ominaisuuksiin yhdessä elektroniikkasuunnittelijoiden kanssa. Ominaisuuksista muodostettiin taulukko, josta nähtiin, mitä toimintoja testataan ja kuinka paljon kanavia toimintojen testaukseen tarvitaan. Tärkeimpiä määritettäviä ominaisuuksia tässä vaiheessa olivat

- sarjaväylien määrä ja tyyppi
- digitaalisten tulojen ja lähtöjen määrä sekä tyyppi
- analogisten lähtöjen ja mittausten määrä

- laitteiden toimintajännitteet
- tehonlähteiden jännitealueet, teho ja virranmittaustarkkuus
- releiden määrä.

### 3.3 Osastojen vaatimukset testauslaitteistolle

Työn tilaajan eri osastojen kanssa pidettiin palavereita, jotta tarpeet testaukselle tulivat selvitettyä mahdollisimman perusteellisesti. Selvitystyö toi uusia näkökulmia ja vaatimuksia testilaitteistolle, jotka otettiin huomioon laitteiden valinnassa ja jatkokehityksessä. Selvityksellä tavoiteltiin sitä, että tuotantotestaus palvelee mahdollisimman kattavasti koko yrityksen tarpeita ja sitä olisi mahdollista laajentaa ja monistaa muiden osastojen käyttöön.

#### 3.3.1 Tuotanto

Elektroniikkatuotannossa oleelliset huomiot uudelle testilaitteistolle keskittyivät sen käytettävyyteen ja turvallisuuteen. Nykyisen tuotantotestausjärjestelmän hajanaisuus, monisivuiset testiohjeet ja manuaaliset testivaiheet olivat ongelmakohtia. Tuotannon sujuvuuden kannalta testilaitteiston huollettavuus ja kalibrointi tulivat myös esille. Tuotantotestiin halutaan mahdollisimman vähän manuaalisia vaiheita ja testin suorittamisen tulee olla operaattorille yksinkertaista. Taustalla oli ajatus prosessin virhemahdollisuuksien minimoinnista, koska tuotantoympäristössä tapahtuu helposti inhimillisiä virheitä.

Nykyisissä tuotantotesteissä testaaja säätää tehonlähteestä jännitealueet ja lukee pahimmillaan viidestä yleismittarista arvoja, joita verrataan testiohjeen arvoihin. Testin tulos on riippuvainen testaajan tarkkuudesta ja huolellisuudesta, mikä on kyseenalaista laadunvarmistusprosessissa. Ongelma ratkaistiin Ethernet-liitännän kautta ohjattavilla tehonlähteillä ja analogiamoduulilla, joka muuttaa mitatut jännite- ja virta-arvot tietokoneella tulkittaviksi digitaalisiksi arvoiksi. Uudella testiasemalla testiohjelman tallennetaan tarvittavat jännitealueet, joiden mukaan tehonlähteitä ohjataan. Testiohjelmassa on myös raja-arvot mitattaville jännitteille ja virroille, joita verrataan mitattuun arvoon automaattisesti.

Turvallisuusvaatimuksena tuotantotesteille oli, että testit täytyy suorittaa suojatussa tilassa jännitteen ylittäessä 60 voltin jännitearvon. Kaikki yli 60 voltin jännitteen sisältävät komponentit on oltava testiasemalla siten, että operaattori ei voi saada sähköiskua. Nykyisissä testilaitteissa sähköturvallisuus oli ratkaistu kuvulla, joka estää pääsyn testiympäristön jännitteellisiin alueisiin ja auki ollessaan katkaisee jännitteet. Vaihtoehtoina jännitteen katkaisemiselle oli kuvun kaltainen mekaaninen

ratkaisu tai valoverho. Uudella testiasemalla päädyttiin käyttämään valoverhoa, koska testiasema tulee olemaan fyysisesti isompi kuin aiemmat. Valoverho on myös käyttäjäystävällinen vaihtoehto, ja menetelmä on todettu toimivaksi testiasemalla yrityksen toisessa tuotantosolussa. Valoverhon tuli täyttää PLe-luokitus, mikä tarkoittaa käsi- ja sormiturvallista valoverhoa.

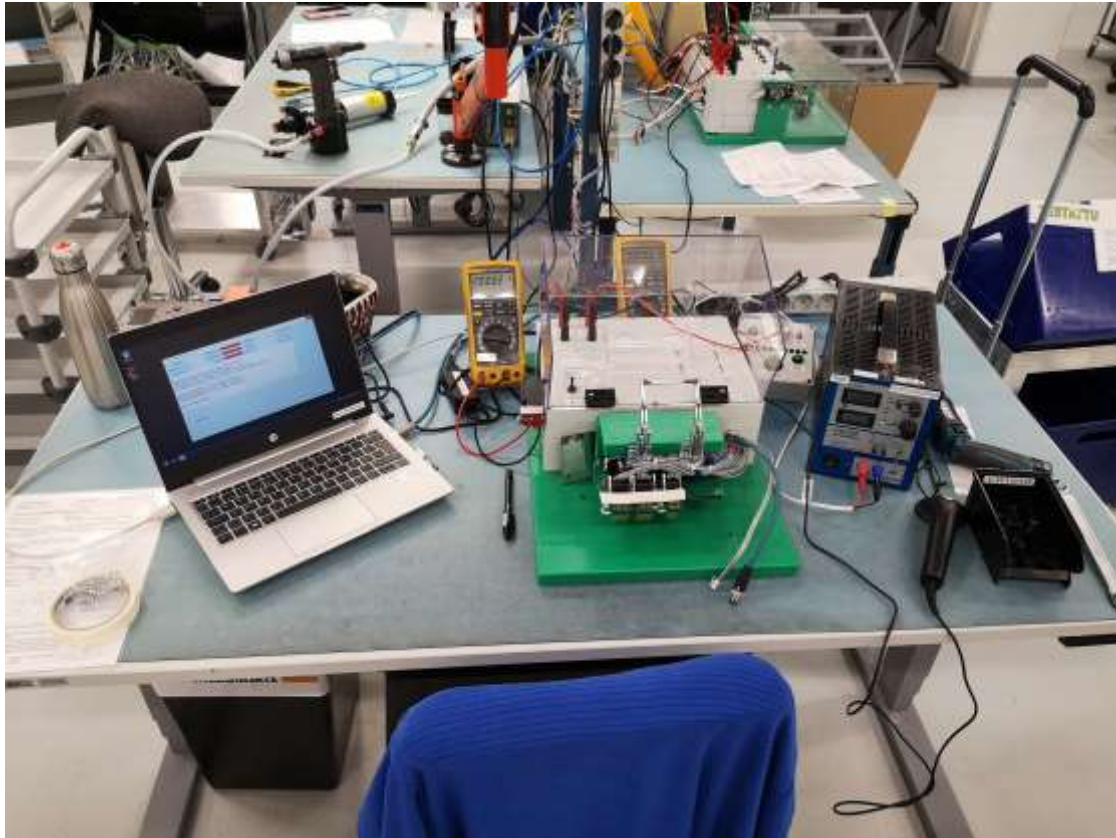
Kalibrointi ja huollettavuus ovat tuotannon kannalta oleellisia asioita. Elektroniikkatuotannon lukuisien mittalaitteiden ja testerien kalibrointi toteutetaan Teknowarella muutamana päivänä vuodessa. Tuotannon kannalta tämä on paras ja helppoiten ennakoitava ratkaisu eikä vaadi jatkuvaa suunnittelua. Näin toimitaan myös uuden testilaitteiston kohdalla. Muihin huoltoihin varauduttiin investoimalla laadukkaisiin valmistajiin ja huomioimalla laitteiden saatavuus tulevaisuudessa. Huollettavuuden kannalta tärkeää oli myös laitteiston dokumentointi.

Projektin päätteeksi luotiin osaluettelo (liite 1), joista kävi ilmi komponenttien osanumerot ja malli. Lisäksi laitteistosta piirrettiin kaavio (liite 2), jotta laitteita vaihtaessa ja huoltaessa kytketään laitteet oikein. Kytkeillä laitteet väärin saatetaan rikkoa arvokkaita komponentteja. Huoltotoimenpiteiden helpottamiseksi testiaseman layoutiksi valittiin 19” laitekaappi, jonka vieressä on pöytä testien suorittamista varten. Laitekaappiin laitteet saadaan asennettua siististi, määritettyä niille tarkat paikat ja suojattua tuotantoympäristön vaikutuksilta.

### **3.3.2 Tuotekehitys**

Tuotekehityksen vaatimuksia kartoittaessa huomioitiin kaikki kolme tuotekehitysosastoa, jotka ovat ajoneuvotuotekehitys, turvalatuotekehitys ja uustuotekehitys. Suurin tarve tuotantotestauksen kehittämiseksi nähtiin ajoneuvopuolen tuotekehityksessä, koska testauksen suunnittelu vei runsaasti aikaa tuotekehitysprosessista. Testauksen suunnittelu on aikaa vievää, koska uuden tuotteen tuotantotestaus tarkoitti koko testisysteemin suunnittelua. Testisysteemin suunnittelu sisälsi testilaitteiston kytkennän suunnittelun, testilaitteiston ohjelmoinnin, testattavan tuotteen testisovel-

luksen ja testin käyttöliittymän koodauksen. Lukuisat testilaitteistot koostuivat irrallisista mittalaitteista, erinäisistä ohjelmistoista ja tietokannoista (kuva 9). Tilanteesta syntyi tarve kehittää tuotantotestaukselle selkeä järjestelmä ja vakioda käytetty laitteisto sekä testiohjelmisto.



*KUVA 9. Teknowaren tuotantotestauslaitteisto yhdelle tuotteelle*

Turvavalopuolen tuotekehitysosastolla tuotantotestaus ei ollut samankaltainen ongelma, mutta osaston tarpeet otettiin testerin suunnittelussa huomioon tulevaisuuden varalta. Turvavalotuotekehityksen lisävaatimukset laitteistoon olivat RS-232-sarjaliikenneväylä ja laajemmalla jännitealueella varustettu tehonlähde. Sarjaliikenneväylällä tarkoitetaan tiedonsiirtoväylää, jossa tieto kulkee peräkkäin bitti kerrallaan. Teknowaren tuotteissa käytetyt sarjaliikenneväylien tyypit ovat RS-232 ja RS-485. Vain RS-485-väylää käytetään ajoneuvotuotteissa. Turvavalaisin osaston tarpeet huomioitiin varaamalla laitekaappiin tila tehonlähteelle ja yksi tyhjä PCIe-korttipaikka tietokoneeseen. PCIe tarkoittaa tietokoneeseen asennettavan lisälaitteen liitännän tyyppiä.

Teknowaren kolmannen tuotekehitysosaston uustuotekehityksen toive oli testauksen kehittäminen automatisoituun suuntaan. Hyvä esimerkki automatisoinnin tarpeesta on junan ajovalo. Ajovaloa testatessa testaaja operoi manuaalisesti valoa kääntelevän servomoottorin käyttöpaneelia ja testerin tietokonetta monisivuisten ohjeiden avulla. Lähtökohtaisesti automaatiota voidaan parantaa

LabVIEW:n ansiosta, mutta ajovalon tyyppinen tuote vaatii omanlaisen testiympäristön. Aikataulun vuoksi kartoitus tällaisten tuotteiden testaamisesta rajattiin opinnäytetyöstä pois.

### **3.3.3 After sales**

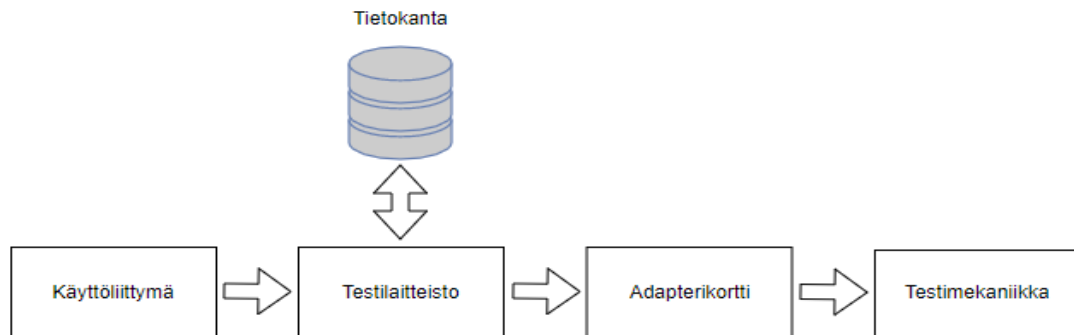
After sales -osaston vaatimukset liittyivät tuotteen jäljitettävyyteen. Jäljitettävyyden nykyinen taso palveli heikosti osaston päivittäisiä toimia. Suurin vaikuttaja oli yksilöllisten tunnisteen puuttuminen suurimmalta osalta tuotteista, jonka seurauksena tuotteita ei voida yhdistää testituloksiin eikä käyttökohteeseen. Testiraporttien saatavuus sarjanumeroiden perusteella auttaa tilanteissa, joissa asiakkaalle täytyy todentaa, että laitteet ovat hyväksytysti testattu. Testiraporttien lisäksi osalle asiakkaista on reklamaatioprojektien aikana näytettävä lista, mistä ilmenee kaikki heille myydyt tuotteet ja kaikki päivitetty tai vaihdettu tuotteet. Myyntimäärät eivät usein täsmää ajoneuvoista löydettyjen laitteiden kanssa, jolloin päivitys ja vaihtotilastoja ei voida pitää varmana tietona. Myöskään yrityksen omaan käyttöön haetuista tuotteista ei kirjata tuotantoerän tietoja tai sarjanumeroita ylös. Seurauksena kirjaamattomista sisäisistä tuotehauista ja asentamattomista tuotteista ei voida varmuudella sanoa ovatko kaikki ajoneuvoissa olevat tuotteet päivitetty tai vaihdettu.

Selkeä parannus saavutetaan antamalla jokaiselle tuotteelle sarjanumero, tallentamalla testitulokset ja kirjaamalla sisäiseen käyttöön haettujen tuotteiden sarjanumerot ylös. Jotta jäljitettävyyttä vastaisi täysin after sales -osaston tarpeita, tuotteiden sijainnin tieto ei saa katketa toimituksen alkaessa. Tuotteiden yksilölliset sarjanumerot täytyy yhdistää projektinumeroon ja ajoneuvon tunnistukseen ennen tuotteiden lähettämistä, jolloin lopullinen käyttökohde voidaan jäljittää.

### **3.4 Testilaitteiston valinta**

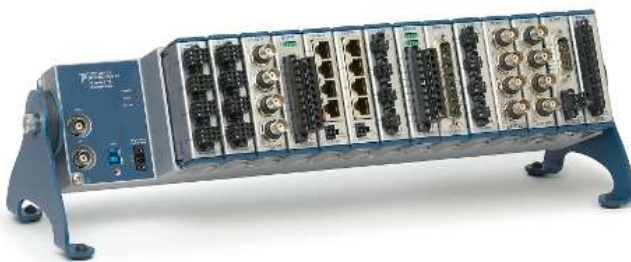
Osasto- ja tuotevaatimusten määrittelyn jälkeen aloitettiin laitteiden valinta. Testausjärjestelmä koostuu viidestä pääosasta, jotka ovat käyttöliittymä, tietokanta, testilaitteet, adapterikortti ja tuotekohtainen testimekaniikka (kuva 10). Laitekaappiin sijoitetaan kaikki testilaitteistoon valitut laitteet, jotka on esitetty laitteiston kaaviossa (liite 2). Adapterikortti on testilaitteiston ja tuotteiden välille suunniteltu rajapinta, jonka avulla testerin lähettämät signaalit viedään testattavalle tuotteelle. Testimekaniikalla yhdistetään testattava laite adapterikorttiin ja testilaitteistoon. Testiaseman layout muodostuu laitekaapista, jonka viereen sijoitetaan pöytä testien suorittamista varten. Testialue suojataan valoverholla. Laitteisto on toiminnaltaan puoliautomaattinen. Puoliautomaattinen tarkoittaa, että testisekvenssin tapahtumat ovat pääosin automaattisia, mutta operaattoria tarvitaan testattavan tuotteen käsittelyyn ja testiä valmisteleviin toimiin.





KUVA 10. Ylemmän tason järjestelmäkuvaus

Laitteiston valinnassa keskipisteenä oli National Instrumentsin CompactDAQ-kehikko (cDAQ) ja erilaiset C-sarjan moduulit (kuva 11), jotka luovat tarvittavat signaalit testin aikana. Elektroniikan testaukseen toinen paljon käytetty kehikon malli on PXI, johon käy siihen tarkoitettut PCI- ja PCIe-liitännällä varustetut komponentit. PXI-kehikoita käytetään pääasiassa sovelluksissa, joissa testattavia toimintoja ja kanavia on paljon ja testausnopeus on merkittävässä roolissa. National Instrumentsin PXI-kehikkoon sopivat PCIe-kortit ovat huomattavasti kalliimpia kuin C-sarjan moduulit, ja laitteisto hinta olisi noussut tuhansilla euroilla. CDAQ:n ja C-moduulien tarjoama testausnopeus on riittävä Teknowaren tarpeeseen, joten ei ollut syytä harkita PXI-kehikkoa. Valitussa cDAQ:ssa on myös etuja erityisesti tuotannollisessa käytössä. Kehikko on fyysisesti pieni, kestää hyvin värähtelyä ja lämpötilamuutoksia, on helppo huoltaa ja toimii tyypillisellä teollisuusympäristön 9 - 30 voltin jännitealueella. Jo cDAQ:lla testisekvenssi saadaan nykyistä nopeammaksi. Kehikoksi valikoitui 14-paikkainen versio. (25.)



KUVA 11. 14-paikkainen CompactDAQ-kehikko C-moduuleilla (26)

Määritettyjen tuotevaatimusten perustella tehtiin valinnat cDAQ-kehikkoon tulevista moduuleista ja muista laitteista. Testattavat toiminnot ja valitut komponentit on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Testattavat toiminnot ja valitut laitteet

Toiminto	Testilaite
32 PWM lähtöä	NI-9403, 2x 32 kanavaa
4 PWM tuloa	NI-9475, 8 kanavaa
PWM pulssin mittaust	NI-9361, 8 kanavaa
12 digitaalista lähtöä/tuloa	NI-9403, 32 kanavaa
2 CAN-väylää	NI-9362, 1 kanava
2 Ethernet-väylää	Ethernet verkkokortti teollisuus PC:hen, 4 porttia
2 UART-väylää	NI PCIe-8431/8, 8 väylää
6 - 8 RS-485-väylää	NI PCIe-8431/8, 8 väylää
Analogiset mittaukset	NI-9205, 32 kanavaa
0 - 160 V DC syöttöjännite	GW Instek 0 - 160 DC, 720W, ohjelmoitava teholähde
0 - 250 VAC/DC syöttöjännite (turvalatotuotteet)	Vaatus: 0 - 250 AC/DC, väh.100W (ei valittu)

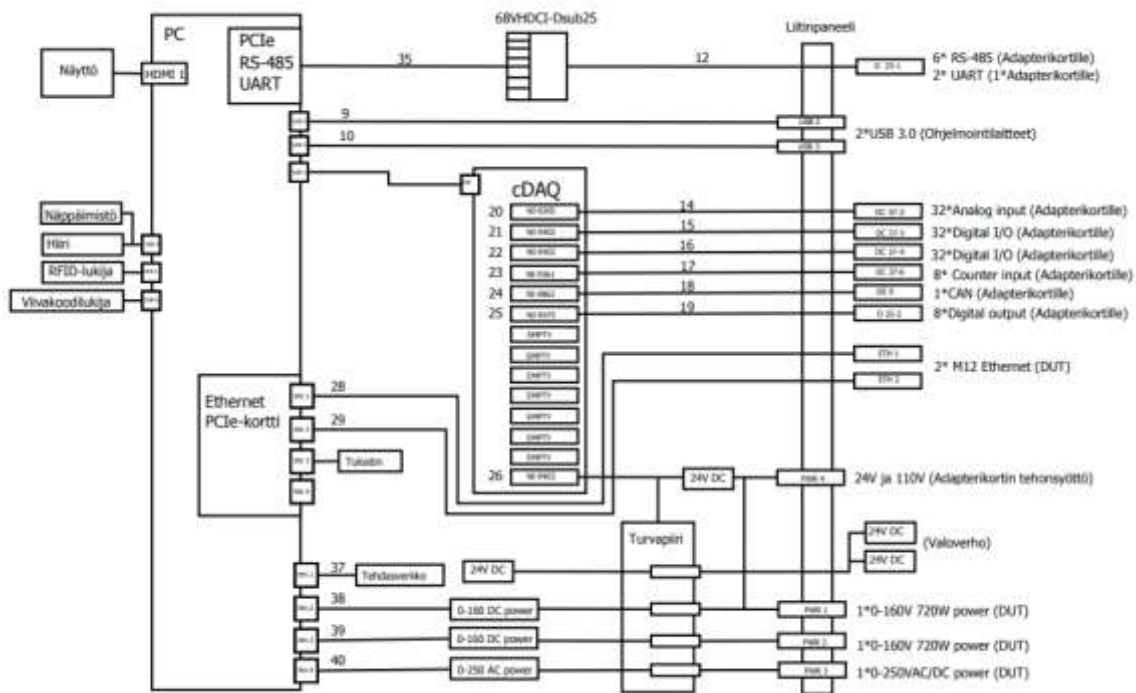
Taulukossa 1 esitetyt komponentit esitettiin vaihtoehtoiseen projektiin yhteistyökumppanille. Yhteistyökumppanilla oli paljon kokemusta National Instrumentsin komponenteista, joten tuki moduulien valinnassa oli erittäin hyödyllistä. Näin myös varmistettiin muiden valmistajien komponenttien, kuten tehonlähteiden LabVIEW-yhteensopivuus. Ethernet- ja RS-485-väylille ei löytynyt moduuleita. Testattavissa tuotteissa on kaksi Ethernet-väylää, jotka päätettiin viedä suoraan testattavalta tuotteelta kaapeleilla testilaitteiston PC:hen. Ethernet-porttien riittävyys varmistettiin hankkimalla PC:hen nelipaikkainen Ethernet-kortti PCIe-liitännällä.

RS-485-väylien ja UART-väylän testaamiseen valittiin National Instrumentsin PCIe-kortti, jossa oli kahdeksan RS-485/422 paikkaa. Näistä kuusi varattiin RS-485-väylille ja kaksi muokattiin adapterikortilla UART-väylille. RS-485-väylät olivat alun perin tarkoitus toteuttaa USB-kytkettävillä laitteilla, mutta laitteiston toimintavarmuuden ja huollettavuuden vuoksi päädyttiin käyttämään PCIe-korttia.

Digitaalisten tulojen ja lähtöjen testaamiseen valittiin 32-kanavaisia I/O-moduuleita kolme kappaletta, joilla laitteistoon saatiin yhteensä 96 digitaalista I/O-kanavaa. Yksi I/O-kortti varattiin laitteis-

ton turvapiiriin tilan seurantaan. CAN-moduulia valittuun cDAQ-kehikkoon oli saatavana vain yksi väyläisenä, joten kahden CAN väylän tuotteita varten suunniteltiin relekytkentä adapterikortille. PWM pulssin eli pulssin taajuuden ja pulssisuhteen mittaamiseen ei ollut saatavana 32-kanavaista moduulia ja tässäkin päädyttiin 8-kanavaiseen moduuliin. Yli kahdeksan PWM-kanavan mittamista varten adapterikortille suunniteltiin relekytkennät, joilla voidaan testata 32 PWM-kanavaa.

Mainittujen laitteiden lisäksi laitteistoon valittiin lukuisia muita komponentteja, jotka ovat esitetty laitteiston osaluettelossa (liite 1). Testerin käytön helpottamiseksi syötettävät tiedot skannataan viivakoodinlukijalla ja testaaja tunnistautuu näyttämällä kulkukorttiaan RFID-lukijaan. Laitteistosta tehtiin kytkentäkaavio hahmottamaan laitteiston toimintaa ja helpottamaan huoltoa (kuva 12).

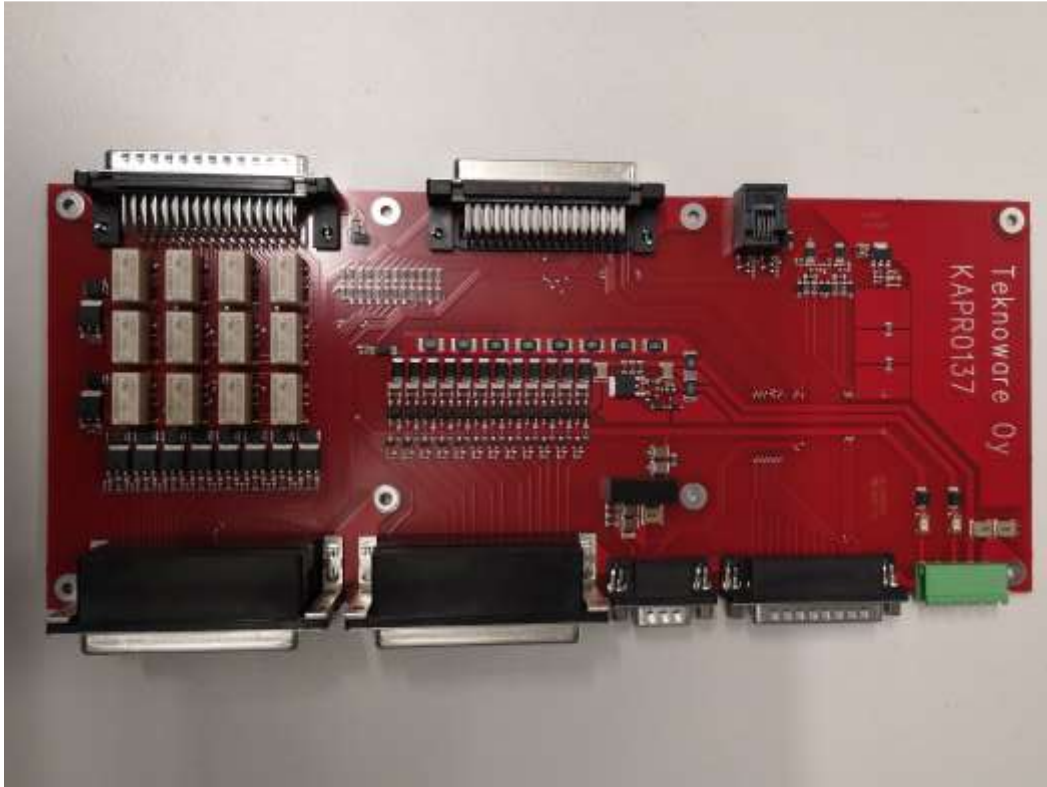


KUVA 12. Testilaitteiston kaavio

### 3.5 Adapterikortti ja testimekaniikka

Adapterikortti on testilaitteiston ja tuotteen välille tuleva piirikortti, joka ohjaa testisignaalit tuotteelle (kuva 13). Adapterikortilta vaadittavat toiminnot tulivat esille laitteistoa valitessa. Adapterikortin suunnittelu aloitettiin laitevalintojen varmistuttua. Suunnittelun lähtökohtina oli käytettävyys ja sopevuus useille tuotteille. Kortin suunnitteluvaiheessa pidettiin useita palavereita kortin suunnittelijan kanssa ja apuna käytettiin laitteiston kaaviota, tuoteominaisuuksista tehtyä taulukkoa ja valittujen

laitteiden datalehtiä. Kortista kehitettiin modulaarinen rajapinta, joka sopii erilaisille tuotteille. Testilaitteistolta tulevat signaalit tulevat seitsemään eri liittimeen, jotka ovat numeroitu väärin kytkemisen estämiseksi. Tuotteelle tarvittavat signaalit kulkevat kahden 50-napaisen D-liittimen kautta. Tuotteen puolen liittimet näkyvät kuvan 13 ylälaidassa.



KUVA 13. Adapterikortti

Testimekaniikalla eli johtosarjalla testattava tuote kytketään adapterikorttiin (kuva 14). Johtosarjan avulla adapterikortilta valitaan tarvittavat toiminnot ja viedään johdot oikeisiin liittimiin testattavalle tuotteelle. Yksinkertaisimmillaan johtosarja liitetään adapterikorttiin yhdellä D-50-liittimellä. Johtosarjan väärin kytkeminen on estetty eri sukupuolen D-liittimillä, jolla estetään tuotteiden ja testilaitteiden hajoaminen. Sekä adapterikortti että johtosarja voi vaihtua testattavan tuotteen mukaan. Molemmat merkitään viivakodeilla, jotta niiden tuotesopivuus voidaan todentaa. Johtosarja on toimiva mekaniikka pienten sarjojen lopputestauksessa. Johtosarjat ja adapterikortit valmistetaan Teknowarella.



KUVA 14. Lopputestauksen johtosarja

### 3.6 Jäljitettävyyden kehittäminen

Jäljitettävyyden kehittäminen aloitetaan luomalla jokaiselle tuotteelle yksilöllinen sarjanumero tuotannon kortti- tai lopputestin yhteydessä. Sarjanumero luodaan tuotteen ohjelmistoon ja tyyppitarraan. Tällöin tuotantotestien tulokset voidaan yksilöidä ja tallentaa. Piirikorttien koon vuoksi 2D-koodi ei mahdu jokaiseen korttiin, joten sarjanumero tallennetaan laitteen ohjelmistoon. Ohjelmistoon luotu sarjanumero mahdollistaa sen, että tuotteen tyyppitarraan voidaan testin lopuksi tulostaa automaattisesti sama sarjanumero kuin ohjelmistossa.

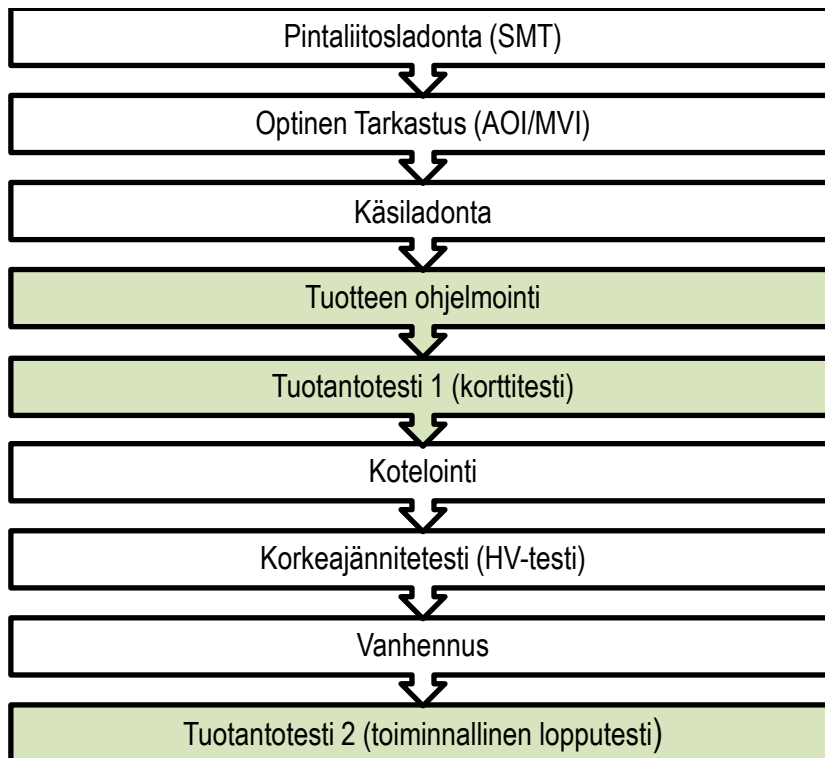
Tuotteiden komponenttien jäljitettävyyden tarve ei ole vielä akuutti, mutta merkkamalla 2D-koodi piirikortteihin siihen on hyvät valmiudet. Teknowarella on jo prosessi, jossa tuotteissa käytettävät materiaalit kirjataan ERP-järjestelmään. Lisäksi ladontakoneilla on valmius komponenttikelojen tunnisteen ja tuotteen tunnisteen yhdistämiseen. Koodin merkitseminen piirikorttiin nopeuttaa myös testausta ja korttien korjausta. Testien tulokset nähdään korjausasemalla skannaamalla kortin koodi. Tarvittava merkkausteknologia on olemassa. Laserilla merkattu 2D-koodi on suora merkintä, joka on luotettava ja pysyvä merkkaukseen tuotteen tyyppitarran lisäksi. Uusien tuotteiden suunnittelussa pyritään varaamaan 2D-koodille tila.

Tärkeä muutos jäljitettävyyden ja testauksen laadun kannalta on tietokantapohjainen testisysteemi. Uusi tietokanta luodaan testiraporttien tallennusta ja sarjanumeroiden jakamista varten. Jokaiselle testattavalle tuotteelle annetaan tietokannasta sarjanumero. Tietokannaksi valittiin alustavasti TestStand-ohjelmiston vakiotietokanta, joka on helposti muokattavissa Teknowaren tarpeisiin. Aiemmin testiraportit tallennettiin testilaitte- tai tuotekohtaisiin tietokantoihin, joista ne varmuuskopioitiin verkkolevyille eri osoitteisiin. Kansioista tiedon etsiminen oli hankalaa etenkin sitä harvoin tarvitseville.

TestStand-tietokannasta saatavat testiraportit luodaan html-muotoon, mikä mahdollistaa testiraporttien lähettämisen suoraan asiakkaille ja edesauttaa after sales -osaston toimintaa. Tuotannon korjauksia varten tulostetaan testiraportit, joista korjaajat näkevät testin hylkäämisen syyn ja pääsevät juurisyyhyyn nopeasti käsiksi. Tarvittaessa tietokantaan tehdään käyttäjäsovellus, jolla testidataa pystytään suodattamaan erilaisilla hakukriteereillä.

### **3.7 Elektroniikkatuotantoprosessi**

Elektroniikan tuotantoprosessissa on useita vaiheita. Piirilevykokoonpanoa on kannattavaa testata ja tarkistaa useissa eri tuotannon vaiheissa, koska virheiden kustannukset kasvavat jokaista vaihetta kohden ja testauskattavuus varmistetaan erilaisilla testeillä. Kuvassa 15 on esitetty tyypillisen Teknowaren valmistaman tuotteen tuotantoprosessi, jonka vihreänä kuvatut vaiheet tehdään uudella testiasemalla. Osa prosessin vaiheiden toteutuksesta riippuu valmistettavasta tuotteesta. Kaikille tuotteille ei tehdä esimerkiksi kourtitestiä tai vanhennusta.

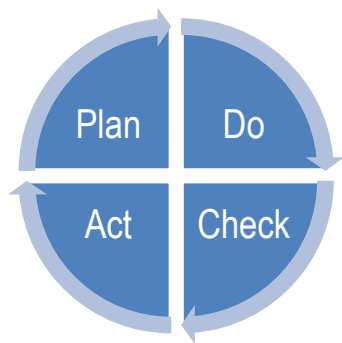


KUVA 15. Teknowaren elektroniikkatuotantoprosessi

### 3.8 Muutokset tuotantotestausprosessiin

Tuotantoprosessin joitain vaiheita jouduttiin muuttamaan tuotantotestausta kehittäessä. Testausprosessia oli välttämätöntä muokata testauksen ja jäljitettävyyden kehittämiseksi. Ehdotetut muutokset käytiin läpi tuotannon kanssa, jotta varmistuttiin muutosten mahdollisuudesta ja arvioitiin mahdollisia haasteita. Osa muutoksista vaikuttavat tuotannon vaiheisiin merkittävästi, mutta tuotantohenkilöstö oli myönteinen kokeilemaan uusia toimintatapoja. On selvää, että muutosten vaikutukset voidaan todentaa vasta ensimmäisten testien suorittamisen jälkeen.

Tuotannon muutoksissa käytetään usein jatkuvan kehittämisen PDCA-mallia, joka on esitetty kuvassa 16. Malliin kuuluvat vaiheet ovat suunnittelu (plan), toteutus (do), tarkastus (check) ja vakautus (act). Hyvien tulosten saavuttaminen vaatii sekä nykyisen ja suunnitellun toimintatavan arviointia ja kritisointia. Jatkuvan kehityksen PDCA-mallissa kehitystä ei keskeytetä, vaan kehityssykli aloitetaan automaattisesti alusta, kun on edelliset muutokset tehty. (27, s. 477.) Testilaitteiston käyttöönoton jälkeen testiprosessia täytyy tarkkailla käyttäjäkokemusten avulla ja muokata sitä toimivammaksi, mikäli puutteita havaitaan.



KUVA 16. Jatkuvan kehityksen PDCA-malli (27, s. 477)

### 3.8.1 Ohjelmoinnin suorittaminen korttitestin yhteydessä

Nykyisessä tuotantoprosessissa tuotteet ohjelmoidaan erillisessä työvaiheessa. Ohjelmointi aiheuttaa turhan nosto- ja laskusyklin tuotantoprosessiin. Uudella testiasemalla tuotteen ohjelmointi tehdään korttitestin yhteydessä samassa vaiheessa, mikä poistaa turhaa liikettä prosessista. Tuotteille, joille ei tehdä erillistä korttitestä ohjelmointi pysyy omana työvaiheena, koska ohjelmointi ei ole mahdollista koteloinnin jälkeen. Ohjelmointia on mahdollista optimoida lisää valmistus- ja testauskeskeisellä suunnittelulla.

### 3.8.2 Testaajan tunnistaminen ja merkintä

Uudella testiasemalla testaajan tunnistaminen ja jäljittäminen toteutetaan käyttäen RFID-tekniikkaa. Jokaisella työntekijällä on henkilökohtainen numeroitu kulkukortti. Testiasemalle sijoitetaan RFID-lukija, johon testaaja näyttää kulkukorttia aloittaessaan testaamisen. Testaajan nimikirjaimet tulevat automaattisesti tyyppitarraan testin päätyttyä. Tämän mahdollistaa Ethernet-liitännän kautta ohjattava tulostin ja kulkukortin RFID-lukija, joka syöttää luetut merkit suoraan LabVIEW:lle. Käyttäjien kulkukorttien hallinta annetaan tuotannon vastuulle. Kulkukortin vaihtuessa tai hävitessä työntekijälle annetaan uusi kortti, joka yhdistetään henkilöstöjärjestelmässä työntekijän henkilönumeroon.

### 3.8.3 Tuotteeseen tulostettavat tarrat

Osaan tuotteista tulostettiin kaksi tarraa tuotannon eri vaiheissa, koska tyyppitarraan ei ollut mahdollista saada yksilöllistä tunnistetta. Kuvan 15 mukaisessa tuotantoprosessissa tuotteen tyyppitarra tulostettiin kokoonpanovaiheessa ja pieni jäljitettävyystarra korkeajännitetestin yhteydessä (kuva 17). Jäljitettävyystarraa käytettiin, jos yksilöllinen sarjanumero oli asiakasvaade. Erillistä jäljitettävyystarraa varten tuotteet vietiin testattavaksi toisen tuotantosolun testiasemalle, koska tarran



tulostus onnistui vain yhdellä asemalla. Tämä pidensi tuotteen läpimenoaikaa ja kuormitti tuotantoa. Jäljitettävyydestä sarjanumeron taakse tallennettiin vain korkeajännitetestin tulokset, koska kortitestin aikana sarjanumeroa ei ollut ja lopputestissä sitä ei hyödynnetty lukuun ottamatta muutamia tuotteita.



KUVA 17. Tuotteen tyyppi- ja jäljitettävyystarra

Kahden tarran liittäminen tuotteeseen oli turhaa, koska sarjanumero on mahdollista yhdistää tyyppitarraan. Sarjanumero haluttiin tyyppitarraan tuotannon viimeisenä vaiheena vain tuotantotestin läpäisseille tuotteille, jolloin se toimii merkkinä hyväksytystä tuotteesta. Haasteeksi muodostui eri testivaiheiden tallentaminen sarjanumeron taakse, koska sarjanumero ei ollut fyysisesti saatavissa. Tässä vaiheessa selvitettiin tuotannon kanssa yhteistyössä prosessimuutoksia, jotka mahdollistivat tyyppitarraa tulostamisen tuotannon lopputestin jälkeen. Keskeisimmät muutokset olivat

- koteloinnin suorittaminen ilman tyyppitarraa
- korkeajännitetestin suorittaminen ilman skannattavaa sarjanumeroa
- vanhennuksen toteutus ilman tyyppitarraa
- tuotteen eteneminen tuotannossa ilman tyyppitarraa.

Koteloinnissa tehdään merkintä tyyppitarraan, jotta ongelmatilanteissa voidaan jäljittää kokoonpanon suorittaja. Virheet voidaan korjata käymällä ne läpi koko solun kanssa, joten kokoonpanijan merkkauksella ei ollut suurta merkitystä ja se voitiin poistaa.

Korkeajännitetestissä tuotteen tunnistaminen toteutettiin skannattavan sarjanumeron sijaan liittämällä testattavaan laitteeseen kaapeli, jonka kautta sarjanumero luetaan. Sarjanumero luetaan huoltoväylän tai sarjaliikenneväylän kautta. Näin korkeajännitetestin tulokset saadaan tallennettua samaan testilokiin kortti- ja lopputestin kanssa. Sarjanumeron tunnistaminen huolto- tai sarjaväylän

kautta ei ole kaikkien tuotteiden kohdalla mahdollista. Uusien tuotteiden suunnittelussa tämä huomioidaan ja tehdään mahdolliseksi.

Vanhennusta eli tuotteen kuormitusta varten tyyppitarrassa oli pieni ruutu, joka mustattiin vanhennuksen jälkeen. Tyypillisesti vain osa tuotantosarjasta vanhennetaan ja merkitään vanhennetuksi. Merkinnän lisäksi vanhennetut laitteet laitetaan vanhennusasemalla eri laatikkoon kuin vanhentamattomat. Ilman tyyppitarraa tuleville pilottituotteille tuotanto kehittää sopivan prosessin, millä vanhennusta seurataan. Tällöin voidaan harkita vanhennuksen suorittamista tuotannon viimeisenä vaiheena, jolloin se voidaan merkitä tyyppitarraan. Vanhennuksessa on tärkeää, että lähtö- ja tuloliittimet erottuvat toisistaan esimerkiksi liittimien tyypillä ja sijainnilla. Liittimien erottuminen huomioidaan uusien tuotteiden suunnittelussa.

Tuotteet kulkevat tuotannon läpi tunnisteena ainoastaan koko erän yhteinen työkortti, kun tyyppitarra asennetaan lopputestin jälkeen. Työkortti tulostetaan jokaiselle uudelle työlle ja se kulkee erän mukana koko tuotannon ajan. Tuotteet ja työkortit ovat siirrettäessä joko laatikoissa tai kuormalavoilla. Työkortin merkitys korostuu entisestään, kun tyyppitarraa ei ole ja etenkin silloin, kun tuotannossa on fyysisesti samannäköisiä tuotteita samaan aikaan. Tuotannon näkemys oli, että tuotannossa ei koskaan liiku töitä ilman työkorttia ja kokeiluun oltiin valmiita.

#### **3.8.4 Tuotantotestin suorittaminen**

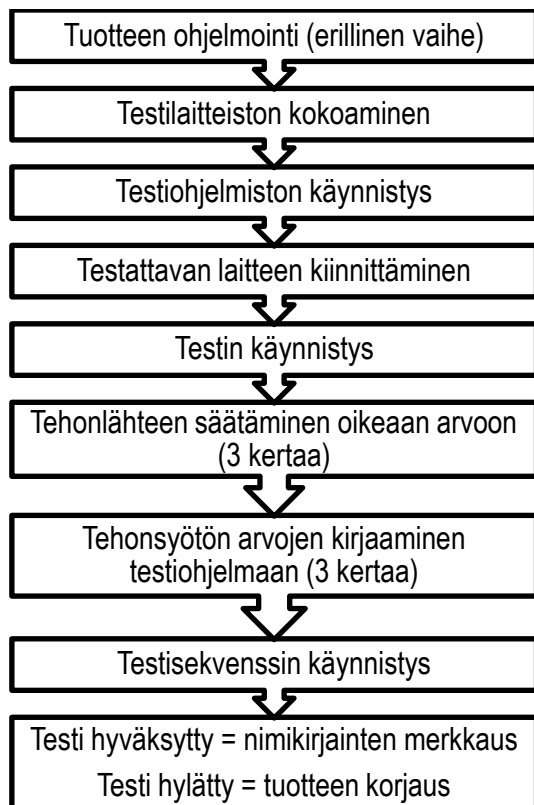
Yksi työn lähtökohdista oli kehittää tuotantotestauksen tehokkuutta. Tuotantotestin suorittaminen koki uudistuksia, jotka tekevät testauksesta aiempaa laadukkaampaa, helpompaa ja tehokkaampaa. Uuden tuotantotestauslaitteiston toimesta poistetut manuaaliset vaiheet ovat

- testilaitteiston kokoaminen
- tuotteen testiohjelmiston valinta
- monisivuiset testiohjeet
- testiarvojen luku ja kirjaus
- tyyppitarran merkkäus.

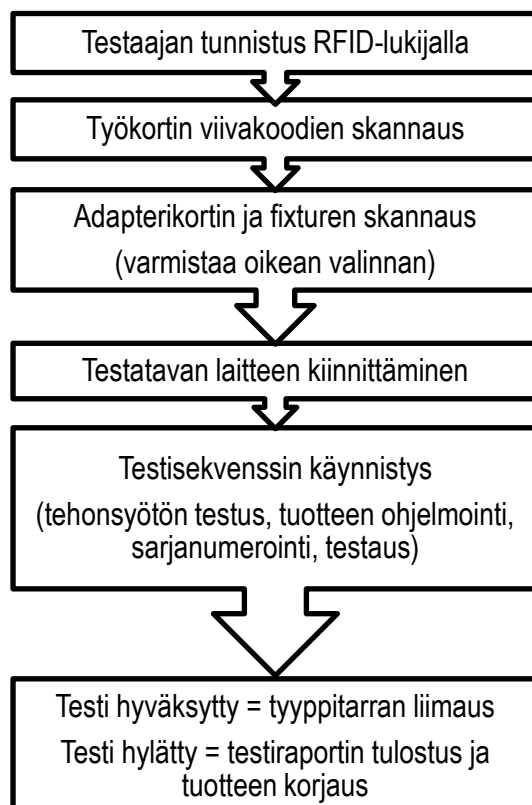
Ensimmäisen uudella asemalla testattavan tuotteen lopputestin testisekvenssistä automatisoitiin 12 testaajan suorittamaa vaihetta, joista tärkeimmät ovat tehonlähteiden säätäminen oikeaan jännitearvoon ja luetun arvon kirjaaminen testiohjelmaan. Operaattori säätää jännitearvoja useaan kertaan manuaalisesti, koska tehonlähteitä ei ohjattu tietokoneen avulla. Esimerkiksi sadan kappaleen tuotantoerässä on tällöin 1 200 manuaalista vaihetta. Kun testaaja kirjaa satoja kertoja arvoja ylös, mahdollisuus luku- tai kirjoitusvirheeseen on suuri.

Testausjännitteiden automaattisen säädön uudella testerillä mahdollistaa Ethernet-liitännän kautta ohjattavat teholähteet ja LabVIEW-testiohjelmaan tallennetut syöttöarvot ja mittausten raja-arvot. Automatisoidut vaiheet ovat selkeä parannus testauksen laatuun, tarkkuuteen ja testaajan työkuvaan. Testiaikojen tarkka vertailu uuden ja vanhan testin välillä jää tämän opinnäytetyön ulkopuolelle, koska testiohjelmistot eivät ole valmiita. On kuitenkin varmaa, että tuotantotestit nopeutuvat manuaalisten vaiheiden poistamisen ja testilaitteiston komponenttien myötä. Vanhan ja uuden tuotantotestin päävaiheet näkyvät kuvassa 18.

#### Vanha tuotantotesti



#### Uusi tuotantotesti



KUVA 18. Vanha ja uusi tuotantotesti

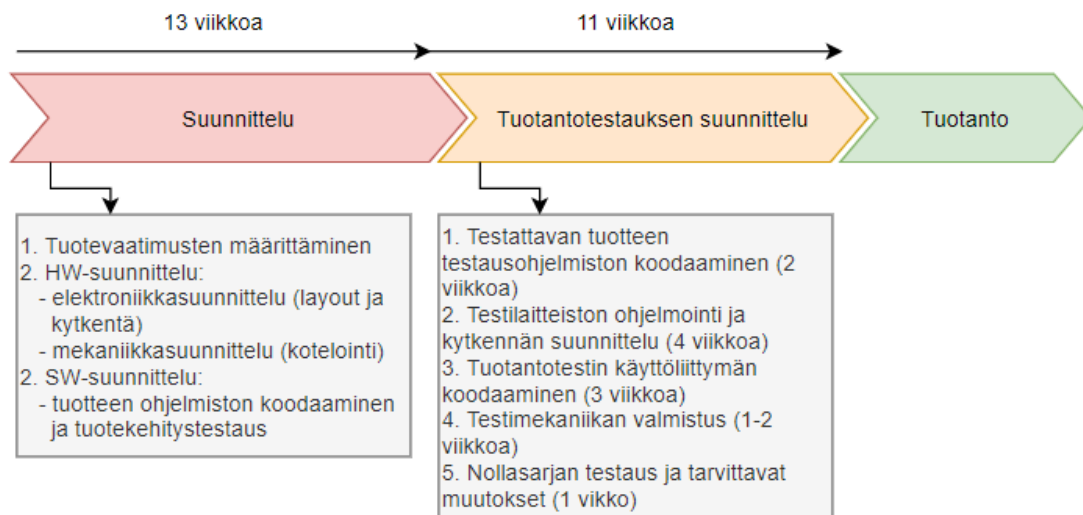
### 3.9 Tuotekehityksen hyödyt

Tuotekehityksen tuotantotestaukseen liittyvässä ohjelmistosuunnittelussa saavutetaan arviolta 5 - 7 viikon hyöty, kun uusi testausjärjestelmä otetaan käyttöön. Nykyisellä testausjärjestelmällä ohjelmistot suunnitellaan testin käyttöliittymälle, testattavalle tuotteelle ja tarvittaessa testilaitteeseen. Tuotantotestausjärjestelmä koostuu erilaisista mittalaitteista, tehonlähteistä, testimekaniikasta, tietokoneesta ja tietokannoista. Muutaman uuden tuotteen tuotantotestauslaitteistoon kuu-

luu tietokone, joka sisältää testiohjelman ja käyttöliittymän. Tietokone helpottaa testin aikana tehtäviä toimia ja mahdollistaa testituloksien tallentamisen, mutta jokaiselle testille oman käyttöliittymän koodaaminen on työlästä eikä usein tule valmiiksi kerralla vaan vaatii kehitystä tuotannon kanssa. (28.)

### 3.9.1 Nykyinen tuotekehitysprosessi

Kuvassa 19 esitetään tuotekehitysprosessi, jossa tuotantotestauksen suunnittelu kesti noin 11 viikkoa. Tuotantotestauksen suunnittelua edeltävään vaiheeseen kuuluu tuotteen elektroniikka-, mekaniikka- ja ohjelmistosuunnittelu sekä ohjelmiston tuotekehitystestit. Tuotekehitysvaiheen testeissä testataan jokainen laitteen toiminto tarkasti.



KUVA 19. Nykyinen tuotekehitysprosessi

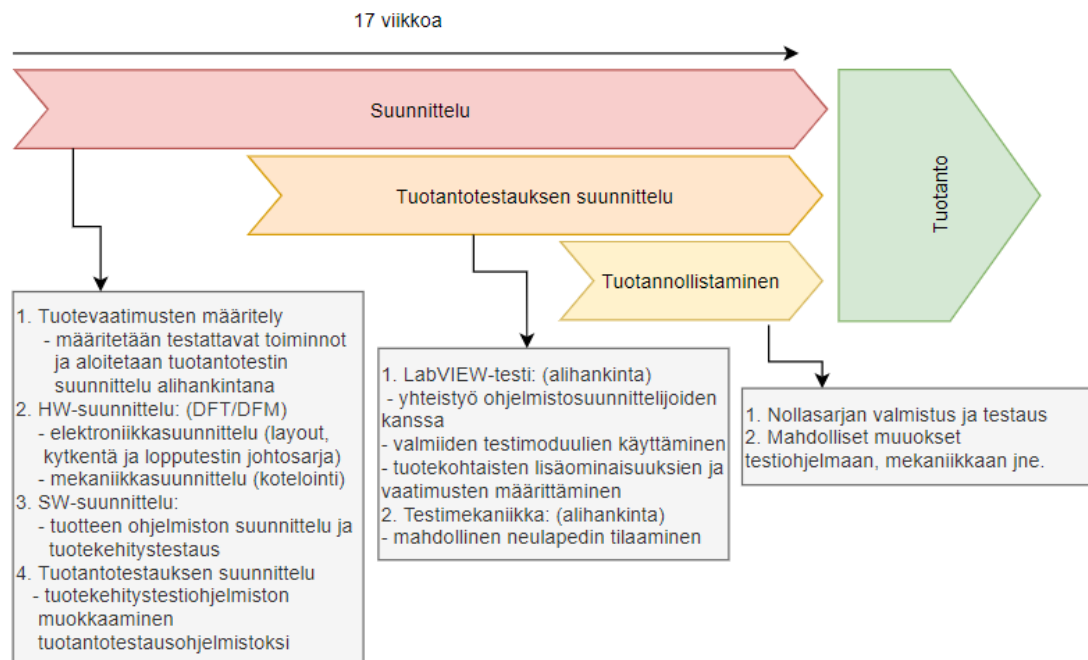
Itse tehtyjen testilaitteistojen huollettavuus kuormittaa sekä tuotekehitystä että tuotantoa. Testilaitteiston hajotessa se tuodaan tuotannosta tuotekehitykseen, jossa alkaa vian etsintä. Tällöin muut työt keskeytyvät tuotekehityksessä, jotta tuotantotestaus saadaan jatkumaan normaalisti. Yhden testerin korjaukseen saattaa kulua useita päiviä tai viikko, jos dokumentaatio on vajavainen ja testerin alkuperäinen suunnittelija ei ole käytettävissä.

### 3.9.2 Uusi tuotekehitysprosessi

Uudella testilaitteistolla sekä laitteet että tuotantotestin käyttöliittymä ovat valmiita ja vakioituja. Testauslaitteistoja hankitaan aluksi kaksi, joista yksi on tuotannossa ja toinen tuotekehityksessä.

Tuotekehitykseen haluttiin identtinen laitteisto, jotta uusien tuotteiden ensimmäisten versioiden testaus nopeutuu, kun testit suoritetaan tuotekehityksessä. Laitteistoa voidaan haluttaessa käyttää myös tuotekehitystesteihin. Tuotantotestin LabVIEW-ohjelman suunnittelu ja koodaus voidaan aloittaa silloin, kun tuotteen tekniset vaatimukset ovat määritelty projektin alkuvaiheessa. Testiohjelmistot suunnitellaan elektroniikka- ja mekaniikkasuunnittelun kanssa samanaikaisesti. Tavoitetilassa testausohjelma on valmis, kun tuote on suunniteltu.

Uusi tuotekehitysprosessi esitetään kuvassa 20. Tuotteen ja testauksen suunnittelun päällekkäisyys mahdollistetaan uudella ohjelmistopohjaisella testausjärjestelmällä. Tuotantotestausta edeltävät vaiheet, jotka tehdään Teknowarella ovat testattavien toimintojen määrittäminen, johtosarjan suunnittelu, sekä tuotteen testaussovelluksen suunnittelu. LabVIEW-testiohjelmat hankitaan alihankintana.



KUVA 20. Uusi tuotekehitysprosessi

Tuotantotestauksen toteuttamiseen tarvittava aika vähenee 11 viikosta neljään viikkoon, mikä tarkoittaa kuuden kuukauden mittaisessa tuotekehitysprosessissa noin kahta kuukautta nopeampaa tuotekehitystä. Ajalliseen hyötyyn vaikuttaa eniten se, miten sujuvaksi testausohjelmistojen tilaaminen ja alihankinta saadaan. On kuitenkin selvää, että testin käyttöliittymän koodauksen ja testilaitteiston kehityksen poistuessa vapautuu merkittävä määrä ohjelmistosuunnittelijoiden resursseja uusille projekteille. LabVIEW-testiohjelmien hankkiminen ulkoiselta toimijalta on järkevää, koska

LabVIEW-ohjelmointi ei ole Teknowaren ydinosuudesta. Teknowaren omat ohjelmistoresurssit on hyödyllistä käyttää uusiin tuotekehitysprojekteihin.

LabVIEW-testien tilausta varten on määritetty, miten tuotteiden toiminnot testataan. Testit tehdään muuttamalla testin parametrejä ja poistamalla tai lisäämällä testin moduuleita laitteen toimintojen mukaan. Teknowaren ajoneuvotuotteilla testimoduuleita on yhteensä 13. Tuotantotestien suunnittelutyökaluna toimii dokumentti, johon moduulit on eritelty ja niiden testaus on kuvattu vaihe vaiheelta LabVIEW-koodausta varten. Dokumentin perustella alihankkija voi luoda testimoduulit LabVIEW-ohjelmaan, joista koostetaan valmiita testiohjelmia.

### **3.9.3 Testausoptimointi**

Testattavan laitteen ohjelmisto suunnitellaan ja testataan tuotekehitysvaiheessa hyvin yksityiskohtaisesti, koska ohjelmiston mahdolliset virheet halutaan löytää ennen tuotantoa. Tuotekehitystestaus tarkoittaa, että ohjelmiston suunnittelija tekee tuotteen jokaiselle ominaisuudelle testin. Tuotekehitystesti on kattavampi ja tarkempi kuin tuotantotesti, mutta sen osia voidaan suoraan hyödyntää tuotantotestausohjelmistossa.

Tuotantotestauksessa käytetty ohjelmisto on testausohjelmisto, joka korvataan testin onnistuttua lopullisella sovellusohjelmistolla. Sovellusohjelmisto on asiakkaan käyttöön tarkoitettu ohjelmisto, joka sisältää asiakkaan haluamat ominaisuudet. Syitä erillisen testausohjelman käyttöön on kolme. Käyttäessä sovellusohjelmistoa tuotantotestissä sitä ei voida muokata tuotteen ollessa markkinoilla, koska asiakassopimukset eivät salli muutoksia laitteen varsinaiseen ohjelmistoon. Kun käytetään erillistä testausohjelmistoa, voidaan ohjelmistoa muokata tarvittaessa koskematta sovellusohjelmistoon. Toinen syy on testausohjelman standardisointi. Erillinen testausohjelma muodostetaan valmiista testimoduuleista, joka helpottaa tuotantotestin LabVIEW-ohjelman tekoa. Kolmas syy on, ettei sovellusohjelmisto ole aina valmis, kun ensimmäisiä tuotteita toimitetaan asiakkaalle. Tällöin sen muokkaaminen aiheuttaa aina muutoksia myös tuotantotestiin, mikä tarkoittaa ylimääräistä työtä.

Molemmat ohjelmistot ohjelmoidaan laitteeseen tuotantotestien aikana. Testiohjelmisto ohjelmoidaan korttitestin aikana ohjelmointiliittimen kautta, kun laitetta ei ole vielä koteloitu. Lopullinen sovellusohjelmisto ja asiakkaan parametrit ladataan tuotannon lopputestin lopussa valmiiseen testattuun tuotteeseen. Lopputestin viimeisenä vaiheena varmistetaan, että sovellusohjelmiston asennus on onnistunut ja tuotteessa on asiakkaan määrittämä parametriversio.

### **3.10 Jatkokehitysideat**

#### **3.10.1 Laitteisto**

Laitteistoa voidaan kehittää liittämällä siihen korkeajännitelaitteisto, jotta tuotteiden kaikki tuotannon testit voidaan suorittaa samalla laitteistolla ilman turhaa liikettä eri testiasemien välillä. Laitekaappiin varattiin tila korkeajännitelaitteistolle ja laitteiston turvapiiri toteutetaan siten, että siihen voidaan myöhemmin kytkeä korkeajännitelaitteet.

Suuria tuotantosarjoja varten laitteistoon voidaan suunnitella helppokäyttöinen testimekaniikka. Mekaniikan suunnittelu edellyttää tuotteiden fyysisten ominaisuuksien selvittämistä. Paljon käytetty malli elektroniikan korttitestauksessa on massaliitännällä varustettu neulapetimekaniikka, johon voidaan suunnitella kohdistusmenetelmä. Mekaniikassa kannattaa ottaa huomioon myös tuotteiden merkkivalojen automaattinen testaus, joka on vielä yksi testin manuaalisista vaiheista.

#### **3.10.2 Jäljitettävyys**

Jäljitettävyyden kehittäminen voi jatkua kehittämällä prosessi, jossa tuotteiden sarjanumerot yhdistetään asiakkaaseen. Kun kaikissa tuotteissa on sarjanumero, voidaan lähetyksiä pakattaessa skannata tuotteiden sarjanumerot. Näin tuotteet yhdistyvät myyntitilaukseen, joka yhdistyy asiakkaaseen. Tieto yksittäisen tuotteen loppukäyttäjistä säilyy yrityksellä ja tukee after sales -osaston toimintaa.

#### **3.10.3 Testaus- ja valmistuskeskeinen suunnittelu**

Testausta ja valmistusta voidaan tehostaa tuotteen suunnitteluvaiheessa. Elektroniikka- ja mekaniikkasuunnittelulla on suuri vaikutus tuotteen valmistuksen ja testauksen jouhevuuteen. Työn aikaisen perehtymisen myötä esiin tulivat seuraavat ideat:

1. Luodaan testipisteistä piirilevyille suunniteltava vakiokomponentti. Samoja toiminnallisuuksia ja komponentteja sisältäville saman kokoluokan tuotteille testipisteiden suunnittelu ja vakiointi on kannattavaa. Parhaillaan eri tuotteet testataan samalla mekaniikalla.
2. Testipisteet suunnitellaan piirilevyaihioon. Korttitestin testipisteet on mahdollista suunnitella piirilevyaihioon, jossa on useita piirilevyjä. Piirilevyaihiot tulevat piirilevyvalmistajalta ja ovat tuotteesta riippumatta saman levyisiä. Saman leveyden ansiosta aihioon sijoitetut

testipisteet mahdollistavat testimekaniikan standardisoinnin ja vähentää manuaalisia nostoja testin aikana. Kiinnittämällä ladottu aihio testeriin voidaan testata kaikki aihion piirikortit kerralla. Haasteena on testissä hylätyn kortin korjaaminen, koska testauksen jälkeen piirilevyt jyrsitään aihioista irti. Hylätyille korteille voidaan harkita yksittäisiä manuaalitestejä tai vaihtoehtoisesti korttien heittämistä pois.

3. Mahdollistetaan tuotteen ohjelmointi koteloinnin jälkeen. Nykyään laitteet ohjelmoidaan ladonnan jälkeen ennen kotelointia, koska kotelointi estää pääsyn ohjelmointiliittimeen. Ratkaisu tähän on ohjelmointipisteiden siirtäminen piirilevyn pohjaan ja kotelon pohjaan leikkava aukko, josta ohjelmointiliitin mahtuu läpi. Aukolla eliminoidaan tuotannosta vaihe, jossa tuotteet siirretään ladontakoneelta ohjelmointipisteelle ja sieltä kotelointiin. Ohjelmointilaitteelle tarvittavan aukon koko on halkaisijaltaan noin 10 millimetriä. Menetelmä edellyttää, että piirilevyaihioiden ohjelmointipisteet valmistetaan piirilevyn alapuolelle ja kotelon pohjaan tehdään levytyössä yksi reikä lisää. Muutosten kustannukset ovat pieniä.

### **3.11 Vastaukset tutkimuskysymyksiin**

Hyvä tuotantotestausjärjestelmä Teknowaren tapauksessa on useille tuotteille muokattavissa oleva testilaitteisto ja ohjelmisto. Ohjelmistopohjaisella testausjärjestelmällä vastataan nykypäivän haasteisiin elektroniikka-alan yrityksessä, jossa uusia tuotteita täytyy saada markkinoille nopeasti ja testauksen täytyy olla kustannustehokasta. Alalla on tehty useita tuotantotestausjärjestelmiä, joiden alustana toimii National Instrumentsin ohjelmistot ja laitteet, joten niitä voidaan pitää hyvänä ratkaisuna. LabVIEW-ohjelmiston tuki useille laitevalmistajille takaa testilaitteiston muokattavuuden tulevaisuudessa. Kun laitteisto kattaa tuotekirjon testaustarpeet se soveltuu erilaisille tuotteille muokkaamalla rajapintoja.

Tuotantotestaus tukee tuotekehitystä hyvin, kun luovutaan tuotekohtaisista testausjärjestelmistä ja mahdollistetaan tuotteen ja testauksen suunnittelun päällekkäisyys. Tämä onnistuu joustavalla testilaitteistolla ja testien alihankinnalla. Valmis testilaitteisto, testausohjelmistot ja testimoduulit vähentävät ohjelmistosuunnittelua merkittävästi. DFT- ja DFM-menetelmiä käyttämällä tehostetaan testausta ja valmistusta. Menetelmillä säästetään tutkitusti resursseja sekä tuotekehityksessä että tuotannossa. Tuotantokustannuksia voidaan pienentää myös tuotekohtaisilla testistrategioilla. Jäljitettävyys ja testiraportit tukevat aiempaa paremmin after sales -osastoa tuotteiden takaisinkutsu ja reklamaatiotapauksissa. Testiraportit tukevat myös tuotantoa ja tuotekehitystä laadun tarkastelussa.



Tärkein käytäntö jäljitettävyyden kehittämisessä on, ettei tuotannosta valmistu tuotteita ilman yksilöllistä tunnistetta. Ensimmäinen edistysaskel on luoda jokaiselle tuotettavalle tuotteelle yksilöllinen tunniste ja tallentaa testitulokset. Näin taataan testien yksilöllinen jäljitettävyys. Seuraava askel on tuotteiden jäljitettävyyshetken säilyttäminen käyttökohteeseen saakka. Komponenttitason jäljittämiseen siirryttäessä on selvitettävä sen tuoma lisäarvo ja kustannukset. Kirjallisuuskatsauksen valossa jäljitettävyyden arvostus on kasvussa ja komponenttitason jäljitettävyys on alalla yleistä, mutta yrityksen on määritettävä haluttu taso hyötyjen mukaan.

## 4 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aihe oli elektroniikkatuotteiden tuotantotestauksen kehittäminen. Työn alkaessa aihe oli vieras, mutta mielenkiintoinen ja tuotantotekniikan opiskelijalle soveltuva. Elektroniikkaan ja testilaitteisiin liittyvissä haasteissa tarvittavan tuen sai Teknowarelta ja työn kolmannelta osapuolelta. Työn laajuus hahmottui projektin alussa ajateltua laajemmaksi ja siksi opinnäytetyötä rajattiin. Työ opetti projektinhallintaa, työvaiheiden järjestelyä ja ongelmanratkaisua. Suuri osa käytännön osuudesta oli tutustumista nykyiseen, hyvin hajanaiseen testausjärjestelmään ja toimintamalleihin. Tutustuminen oli välttämätöntä testauksen kehittämiseksi. Tuotantotestauslaitteisto on valittu opinnäytetyön aikana, ja se vastaa työn tilaajan vaatimuksia. Teknowarella projekti jatkuu uuden testausjärjestelmän ohjelmistokehityksellä, jota seuraa laitteiston käyttöönotto tuotekehityksessä ja tuotannossa.

Työn päämääränä oli kehittää elektroniikkatuotteiden tuotantotestausta suunnittelemalla uusi testausjärjestelmä, joka mahdollistaisi erilaisten tuotteiden puoliautomaattisen tuotantotestauksen ja nopean testien kehittämisen. Lisäksi haluttiin parantaa tuotantotestauksen laatua ja tuotteiden jäljitettävyyttä. Uuden ohjelmistopohjaisen laitteiston myötä tuotantotestien suunnitteluvaihe nopeutui vähentämällä ohjelmistosuunnittelua ja mahdollistamalla tuotteen ja testauksen suunnittelun päällekkäisyys. Resursseja vapautuu uusille projekteille, koska valmis testilaitteisto ja ohjelmisto poistaa useita vaiheita testaukseen liittyvästä ohjelmoinnista. Uusille tuotteille ei tarvitse suunnitella koko testausjärjestelmää.

Jäljitettävyyttä ja testauksen laatua kehitettiin muuttamalla testausprosessia. Jokainen tuote saa yksilöllisen sarjanumeron, jonka avulla testitulokset löytyvät. Testauksen laatu ja tehokkuus paranevat poistamalla testiprosessista manuaalisia vaiheita, jolloin testin tulos ei ole riippuvainen testaajasta. Testauksen laatua ja tehokkuutta voidaan kehittää lisää suunnittelemalla tuotteet paremmin testattaviksi tiiviin osastojen välisen yhteistyön avulla.

Opinnäytetyön tuloksena syntynyttä testilaitteistoa ja tuotantotestausjärjestelmää voidaan pitää onnistuneena. Valitut komponentit todettiin toimiviksi kirjallisen tiedon, työn tilaajan ja projektin yhteistyökumppanin tietämyksen perusteella. Työssä esitetyt pohdinnat jäljitettävyydestä ja testaussuunnittelun tehostamisesta ovat asioita, joihin työn tilaajan kannattaa kiinnittää huomiota. Testaus-suunnittelulle ja jäljitettävyydelle on esitetty etenemissuunta ja seuraavat konkreettiset toimenpi-

teet. Opinnäytetyö olisi selkeytynyt rajaamalla työ pelkästään testilaitteiston kehittämiseen. Jäljitetävyuden ja tuotekehityksen kehittämisen myötä työstä tuli hyvin laaja kokonaisuus, mutta kehitys oli tarpeellista työn tilaajalle ja mielekästä ammatillisen kehityksen näkökulmasta.

## LÄHTEET

1. Reduce Test Station Deployment and Rework Costs. 2019. National Instruments. White Paper. Saatavissa: <https://www.ni.com/fi-fi/innovations/white-papers/06/reduce-test-station-deployment-and-rework-costs.html>. Hakupäivä 11.3.2020.
2. Serban, Marian – Vagapov, Yuriy – Chen, Zheng – Holme, Reg – Lupin, Sergey 2014. Universal Platform for PCB Functional Testing. International Conference of Actual Problems of Electron Devices Engineering. Saratov, Russia. 25. - 26.09.2014. S. 402 - 409. IEEE konferenssijulkaisu. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6958285/authors> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 4.1.2020.
3. Lillrank, Paul 2019. TU-A1100 Tuotantotalous 1 5 op. Tuotantoprosessit ja tuotannon ohjaus. Opintojakson luennot syksyllä 2019. Helsinki: Aalto yliopisto, tuotantotalouden laitos.
4. Palokangas, Lasse 2012. Tuotannon testauksen kehittäminen. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tietotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42162/Palokangas\\_Lasse.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42162/Palokangas_Lasse.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Hakupäivä 4.1.2020.
5. Oresjo, Stig 1999. A test strategy for complex printed circuit board assemblies. Nepcon West. Agilent Technologies Inc. Saatavissa: [https://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/Nepcon99.pdf](https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Nepcon99.pdf). Hakupäivä 26.1.2020.
6. Fault Coverage. 2010. OnTest Engineering. Saatavissa: <https://testview.wordpress.com/fault-coverage/>. Hakupäivä 1.3.2020.
7. PCOLA/SOQ Explained. Optimum Design Associates Blog. Saatavissa: <http://blog.optimumdesign.com/pcola-soq>. Hakupäivä 26.1.2020.
8. Supercharging Test and Measurement Systems with Intel Xeon CPU and PCI Express Gen 3 Technology. 2019. National Instruments. Saatavissa:

- <https://www.ni.com/fi-fi/innovations/white-papers/15/supercharging-test-and-measurement-systems-with-intel-xeon-cpu-a.html>. Hakupäivä 23.2.2020.
9. Laine, Sonja 2014. Tuotantotestauksen kehittäminen, optiset säänmittausanturit. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, tietotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/75056>. Hakupäivä 4.2.2020.
  10. Ahola, Miikka 2007. Elektroniikan tuotantotestaus, testausjärjestelmän suunnittelu. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, tietokone-elektroniikka. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/11951/2008-04-16-25.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Hakupäivä 4.2.2020.
  11. Golan, Elise – Krissoff, Barry – Kuchler, Fred – Calvin, Linda – Nelson, Kenneth – Price, Gregory 2004. Traceability in the U.S. Food Supply: Economic Theory and Industry Studies. USDA. Saatavissa: <https://ageconsearch.umn.edu/record/33939/>. Hakupäivä 19.3.2020.
  12. Cheng, M.J. – Simmons, J.E.L. 1993. Traceability in Manufacturing Systems. International Journal of Operations & Production Management of October 1994. Vol 14:10, s. 4 - 16. Saatavissa: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01443579410067199/full/pdf?title=traceability-in-manufacturing-systems>. Hakupäivä 6.1.2020.
  13. SFS-EN ISO 9001: 2015. 2017. Laadunhallintajärjestelmät. 5. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
  14. Fisher, William 2015. Benefits of Food Traceability. Food Safety magazine. Saatavissa: <https://www.foodsafetymagazine.com/enewsletter/benefits-of-food-traceability/>. Hakupäivä 19.3.2020.
  15. Tuotteiden jäljitettävyyys. 2019. Tukes. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/vaati-mustenmukaisuus/tuotteiden-jaljitettavyys>. Hakupäivä 19.3.2020.

16. Mead, Neil 2015. Understanding Traceability. Automation Magazine. Saatavissa: <https://www.automationmagazine.co.uk/articles/understanding-traceability/>. Hakupäivä 18.1.2020.
17. Grieves, Michael 2005. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking. McGraw-Hill. Saatavissa: <https://learning.oreilly.com/library/view/product-lifecycle-management/9780071452304/> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 11.1.2020.
18. Cucu, T.C – Varzaru, G – Turcu, C – Codreanu, N.D – Plotog, I – Fuica, R 2008. 1D and 2D solutions for traceability in an Electronic Manufacturing Services company. 31<sup>st</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology. Budapest, Hungary. 7.-11.05.2008. S. 585 - 588 IEEE Konferenssijulkaisu. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5276596> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 12.1.2020.
19. Shannon, Geoff 2015. How to Choose the Right Marking Technology for your Application. Saatavissa: [http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?requestURL=%2Fapex%2Feducationalresources\\_articles&file=0153400000255FW](http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?requestURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=0153400000255FW). Hakupäivä 19.3.2020.
20. PCB marking. Control Micro Systems. Images. Saatavissa: <https://www.cmslaser.com/industrial-applications-for-lasers/pcb-marking/>. Hakupäivä 19.1.2020.
21. Pascoe, Norman 2011. Reliability Technology: Principles and Practice of Failure Prevention in Electronic Systems. Wiley. Saatavissa: <https://learning.oreilly.com/library/view/reliability-technology-principles/9781119991366/chapter02.html> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 12.1.2020.
22. Ungar, Louis Y 2010. Testability design prevents harm. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Vol 25:3, S. 35 - 43. IEEE lehtijulkaisu. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5463955> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 18.1.2020.

23. Kärkkäinen, Tero 2020. Tuotekehityksen projektipäällikkö, Teknoware Oy. Haastattelu 23.1.2020.
24. Boothroyd, Geoffrey 1994. Computer-Aided Design. Product Design for Manufacture and Assembly. Vol 26:7, S. 505 - 520. Saatavissa: <http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/de-barbajr/01.Fundamentos%20de%20Projeto/Artigos/14%20-%20DfMA%20-%20Pro-duct%20design%20for%20manufacture%20and%20assembly%20%281994%29.pdf>. Hakupäivä 26.1.2020.
25. McNally, James. What is PXI? Wiresmith Technology. Saatavissa: <https://www.wiresmithtech.com/articles/what-is-pxi/>. Hakupäivä 3.2.2020.
26. Individuelle konfigurierbare Plattform für kompakte und portable Mess- und Prüfsysteme. 2015. Messweb.de. Saatavissa: <https://www.messweb.de/aktuelle-nachrichten/cdaq-9179.html>. Hakupäivä 10.2.2020.
27. Sokovic, M. – Pavletic, D. – Kern Pipan, K. 2010. Quality Improvement Methodologies – PDCA Cycle, Radar Matrix, DMAIC and DFSS. Vol 43:1, S. 476 - 483. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Saatavissa: [http://jamme.ac-msse.h2.pl/papers\\_vol43\\_1/43155.pdf](http://jamme.ac-msse.h2.pl/papers_vol43_1/43155.pdf). Hakupäivä 4.2.2020.
28. Villstedt, Juha 2020. Ohjelmistosuunnittelija, Teknoware Oy. Haastattelu. 7.2.2020.

Komponentti	Valittu laite	Valmistajan ID
Teollisuustietokone	Advantech ACP2020	ACP2020
Ethernet verkkokortti	Intel Server Adapter I350-T4	I350T4V2BLK
PCIe RS-485	NI PCIe-8431/8	780592-01
cDAQ-kehikko	cDAQ-9179	783597-01
Adapterikortti	Valmistetaan Teknowarella	KAPR0137
Tehonlähde 1	GW instek PSW 160-7.2 (Multi-Range DC Power Supply)	PSW 160-7.2
Tehonlähde 2	GW instek PSW 160-7.2 (Multi-Range DC Power Supply)	PSW 160-7.2
Tehonlähde 3 (optio)	0-250 VAC/DC, Ei valittu	
Ohjelmointilaite ja USB liitäntä	STLink V3 SET ja USB kaapeli + adapteri	STLINK-V3SET
USB 3.0 liitäntä	USB kaapeli + adapteri	
RS-485 Sovitin	Valmistetaan Teknowarella	KAPR0144
PCIe kaapeli (RS-485)	Phoenix Contact 1656291	1656291
Adapterikortin tehonlähde	Siemens tehonlähde 24 V 5A, DIN kiskoon asennettava	6EP1333-2BA20
Moduulien 1,2,3,4,7 kaapelit	DC 37 -DC 37 -johdin uros/naaras	778621-01
Moduulin 5 kaapeli	DE 9 - DE 9 -johdin naaras/naaras	192017-02
Moduulin 6 kaapeli	D 25 - D 25 -johdin uros/naaras	192568-01
Moduuli 1	NI-9205, analogiamoduuli, 32 kanavaa	779357-01
Moduuli 2	NI-9403, I/O moduuli, 32 kanavaa	779787-01
Moduuli 3	NI-9403, I/O moduuli, 32 kanavaa	779787-01
Moduuli 4	NI-9361, laskurimoduuli, 8 kanavaa (PWM mittaukset)	783407-01
Moduuli 5	NI-9862, CAN moduuli, 1 kanava	781639-01
Moduuli 6	NI-9475, digitaalinen output moduuli, 8 kanavaa	780132-01
Moduuli 7	NI-9403, I/O moduuli, 32 kanavaa	779787-01
RFID lukija	Sebury RFID EM 125kHz reader, USB	FK1
Ethernet -johdin (M12 4pin - RJ45)	Lumberg Automation 0985 YM573530 103/2M	0985 YM573530 103/2M
Tyypitarratulostin	Toshiba B-EX4T1, teollisuustulostin	18221168769
Hiiri		-
Näppäimistö		-
Näyttö		-
Viivakoodilukija	Honeywell xenon 1950gHD kit	1950GHD-2USB-R
68 pin VHDCI - 8xD9 -kaapeli	NI PCIe-8431/8 (kortin mukana tuleva kaapeli)	
Turvapiirin tehonlähde	Siemens tehonlähde 24 V 5A, DIN kiskoon asennettava	
Tehonlähteiden ja tulostimen kaapelit	RJ45-RJ45	-
Liitinpaneeli	2X USB 3.0 liitäntä, adapterikortin tehonsyöttöliitäntä, DUT tehonsyöttö liitännät	
Valoverho (lähetin + vastaanotin)	SICK deTec4 Core	C4C-SA07830A10000, C4C-EA07830A10000
Laitekaappi	24 U laitekaappi Warecomp SRS	SRS2460602611.1



